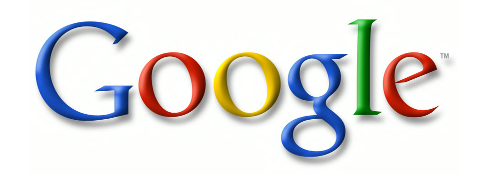


This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

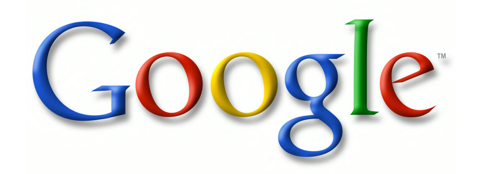
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at http://books.google.com/



Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

Nutzungsrichtlinien

Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

+ *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.
+ *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.
+ *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.
+ *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

Über Google Buchsuche

Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter `http://books.google.com` durchsuchen.



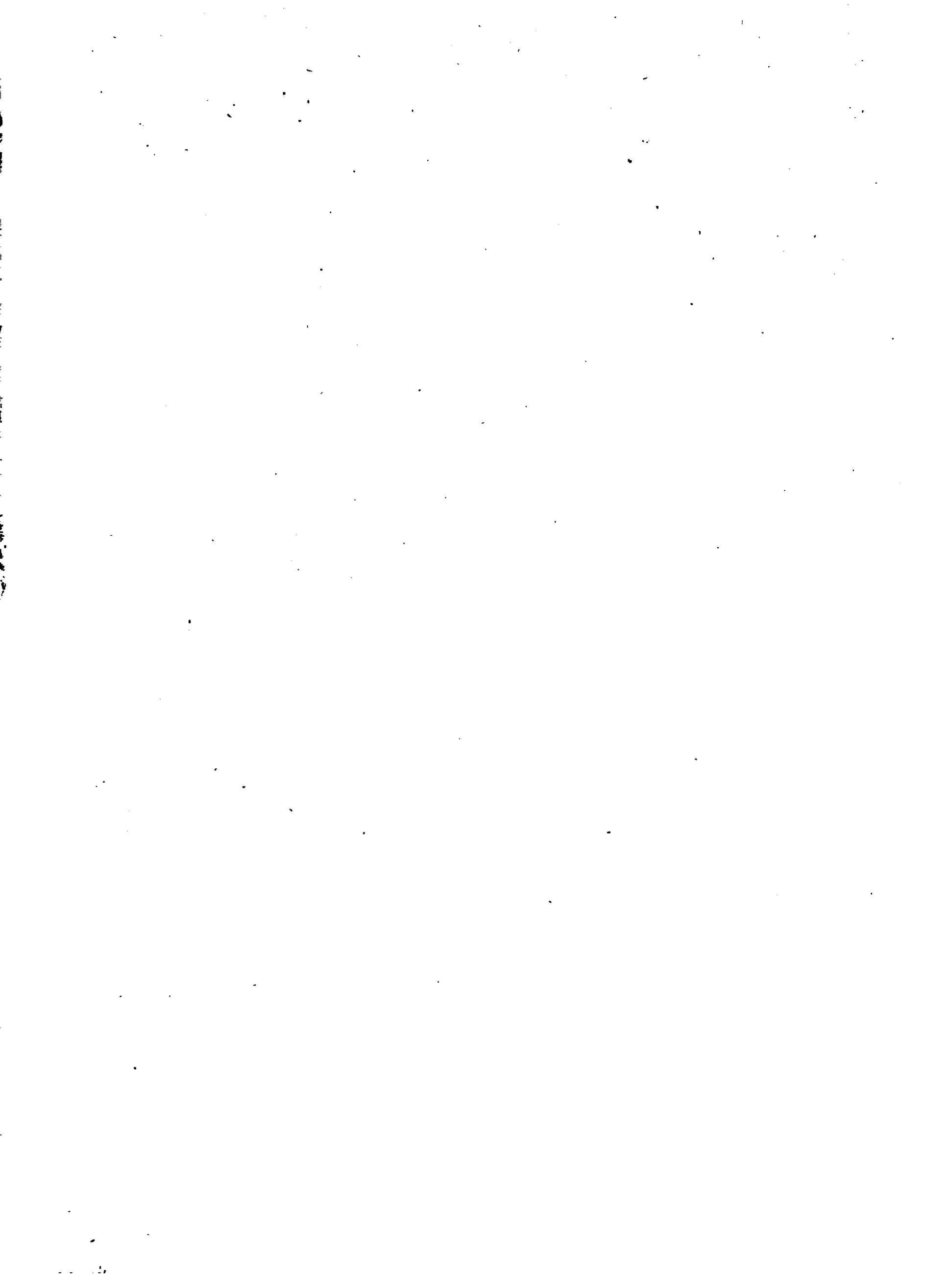
TNF
W65
Elektro-technische
BIBLIOTHEK
Die
elektrischen Mess-
und
Präcisions-Instrumente.

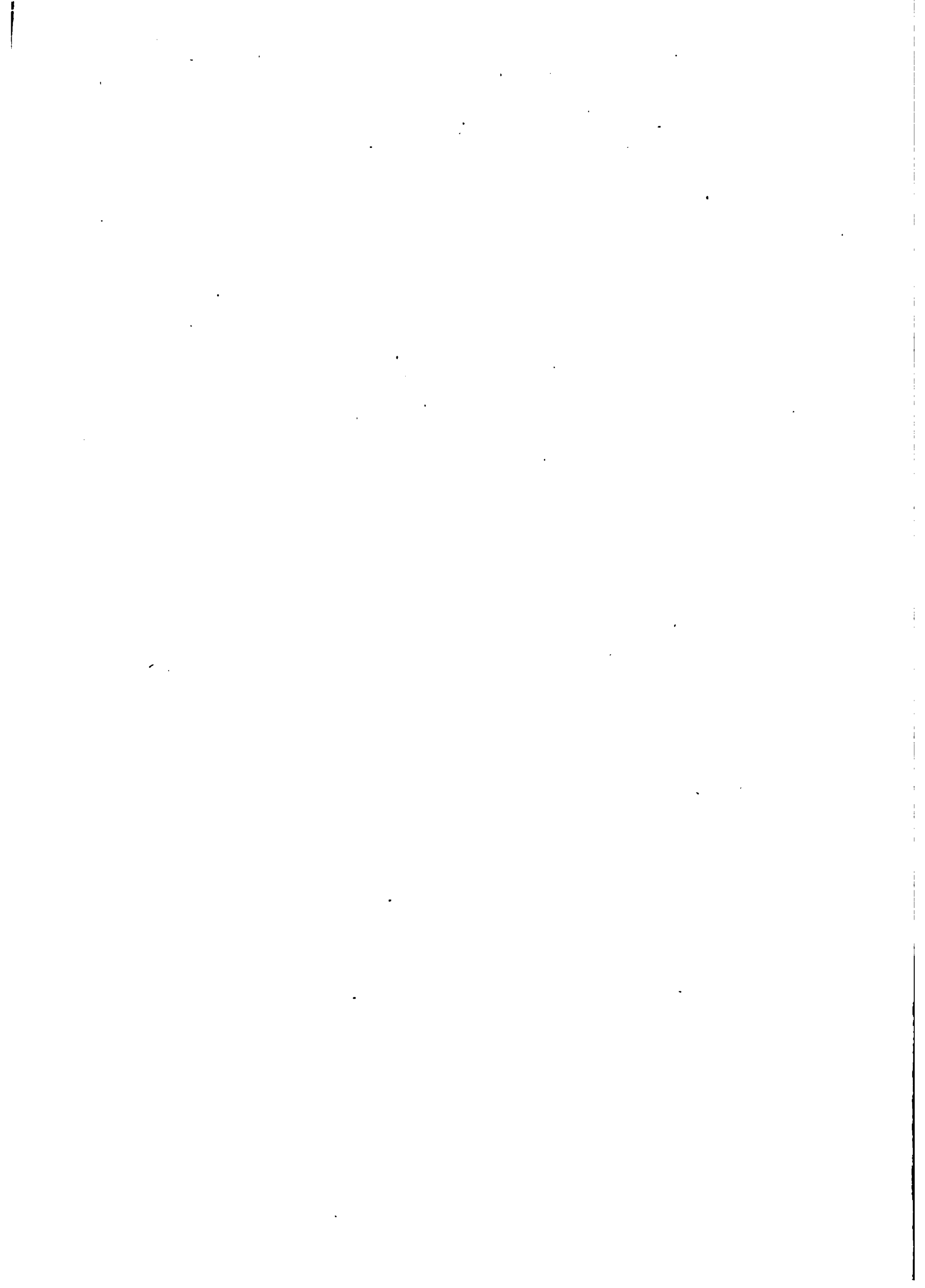
Library

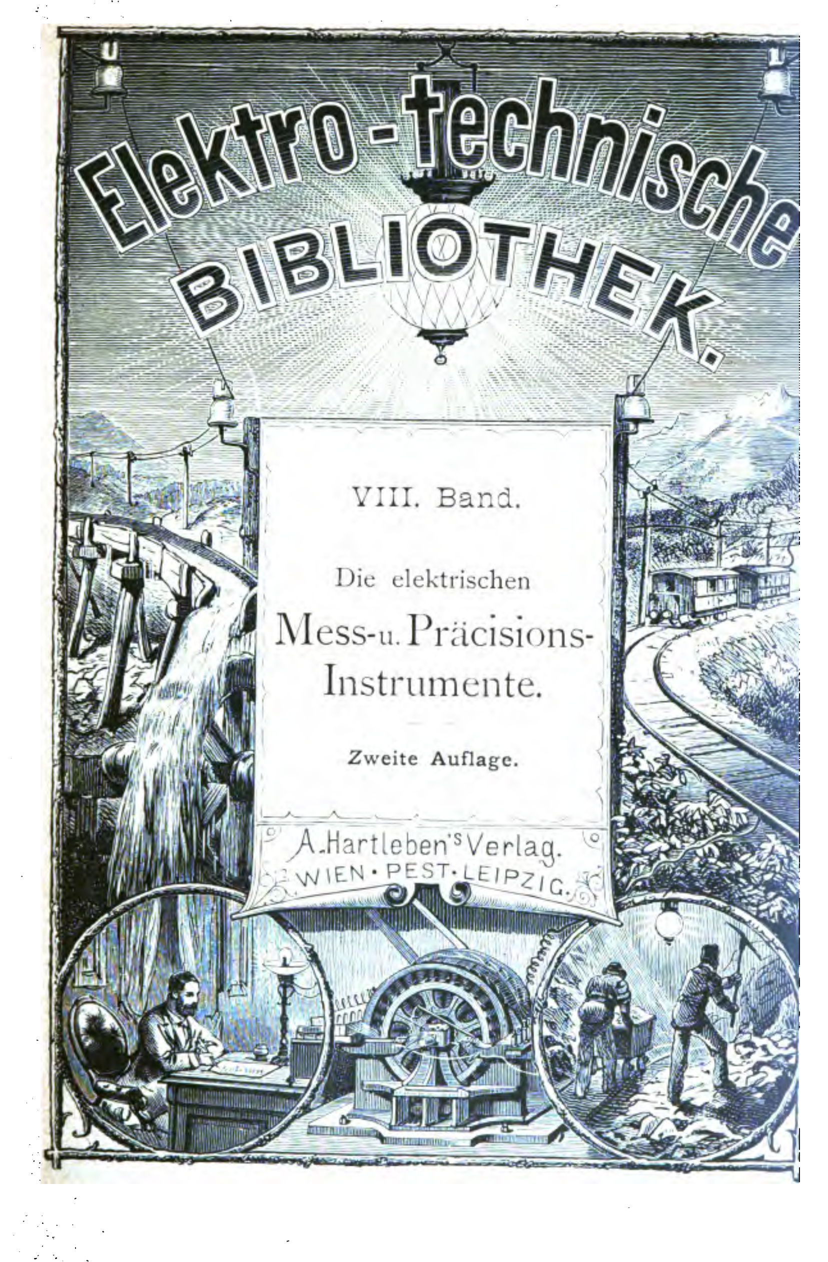
of the

University of Wisconsin









Elektro-technische
BIBLIOTHEK.
VIII. Band.
Die elektrischen
Mess- u. Präcisions-
Instrumente.
Zweite Auflage.
A. Hartleben's Verlag.
WIEN · PEST · LEIPZIG.

A. Hartleben's Elektro-technische Bibliothek.

In reich illustrirten Bänden, geheftet à 1 fl. 65 kr. ö. W. = 3 Mark = 4 Francs = 1 R. 80 Kop.; elegant gebunden à 2 fl. 20 kr. ö. W. = 4 Mark = 5 Fr. 35 Cts. = 2 R. 40 Kop.

Inhalt der Sammlung:

I. Band. Die magnet-elektrischen und dynamo-elektrischen Maschinen und die sogenannten Secundär-Batterien, mit besonderer Rücksicht auf ihre Construction. Von Gustav Glaser-De Cew. Vierte Auflage. — II. Band. Die elektrische Kraftübertragung und ihre Anwendung in der Praxis, mit besonderer Rücksicht auf die Fortleitung und Vertheilung des elektrischen Stromes. Von Eduard Japing. Zweite Auflage. — III. Band. Das elektrische Licht. Von Dr. A. v. Urbanitzky. Zweite Auflage. — IV. Band. Die galvanischen Batterien, Accumulatoren und Thermosäulen. Eine Beschreibung der hydro- und thermo-elektrischen Stromquellen, mit besonderer Rücksicht auf die Bedürfnisse der Praxis. Von W. Ph. Hauck. Zweite Auflage. — V. Band. Die Verkehrs-Telegraphie, mit besonderer Rücksicht auf die Bedürfnisse der Praxis. Von J. Sack. — VI. Band. Telephon, Mikrophon und Radiophon, mit besonderer Rücksicht auf ihre Anwendungen in der Praxis. Von Theodor Schwartze. Zweite Auflage. — VII. Band. Die Elektrolyse, Galvanoplastik und Reinmetall-Gewinnung, mit besonderer Rücksicht auf ihre Anwendung in der Praxis. Von Eduard Japing. Zweite Auflage. – VIII. Band. Die elektrischen Mess- und Präcisions-Instrumente, sowie die Instrumente zum Studium der statischen Elektricität, mit besonderer Rücksicht auf ihre Construction. Ein Leitfaden der elektrischen Messkunde. Von A. Wilke. — IX. Band. Die Grundlehren der Elektricität, mit besonderer Rücksicht auf ihre Anwendungen in der Praxis. Von W. Ph. Hauck – X. Band. Elektrisches Formelbuch mit einem Anhange, enthaltend die elektrische Terminologie in deutscher, französischer und englischer Sprache. Von Prof. Dr. P. Zech. — XI. Band. Die elektrischen Beleuchtungs-Anlagen, mit besonderer Berücksichtigung ihrer praktischen Ausführung. Von Dr. A. von Urbanitzky. Zweite Auflage. — XII. Band. Die elektrischen Einrichtungen der Eisenbahnen und das Signalwesen. Von L. Kohlfürst. — XIII. Band. Die elektrischen Uhren und die Feuerwehr-Telegraphie. Von Dr. A. Tobler. — XIV. Band. Die Haus- und Hôtel-Telegraphie. Von O. Canter. — XV. Band. Die Anwendung der Elektricität für militärische Zwecke. Von Dr. Fr. Waechter. — XVI. Band. Die elektrischen Leitungen und ihre Anlage für alle Zwecke der Praxis. Von J. Zacharias. — XVII. Band. Die elektrische Eisenbahn bezüglich ihres Baues und Betriebes. Von Josef Krämer. — XVIII. Band. Die Elektro-Technik in der praktischen Heilkunde. Von Prof. Dr. Rudolf Lewandowski. — XIX. Band. Die Spannungs-Elektricität und ihre technischen Anwendungen. Von Prof. K. W. Zenger. — XX. Band. Die Welt-Literatur der Elektricität und des Magnetismus, 1860—1883. Von Gustav May. — XXI. Band. Die Motoren der elektrischen Maschinen mit Bezug auf Theorie, Construction und Betrieb. Von Theodor Schwartze. — XXII. Band. Die Generatoren hochgespannter Elektricität. Von Prof. Dr. J. G. Wallentin. — XXIII. Band. Das Potential und seine Anwendungen bei der Erklärung elektrischer Erscheinungen. Von Dr. O. Tumlirz u. s. w., u. s. w.

Jeder Band ist für sich vollkommen abgeschlossen und einzeln käuflich.
Preis geheftet à 1 fl. 65 kr. ö. W. = 3 Mark = 4 Francs = 1 R. 80 Kop.; elegant gebunden à 2 fl. 20 kr. ö. W. = 4 Mark = 5 Fr. 35 Cts. = 2 R. 40 Kop. Die Sammlung kann auch in Lieferungen à 30 kr. ö. W. = 60 Pf. = 80 Cts. = 36 Kop. bezogen werden.
Einzelne Werke werden nur in der Bandausgabe ausgegeben.
Einbanddecken pro Band 40 Kr. ö. W. = 75 Pf. = 1 Fr. = 45 Kop.

Die elektrischen

MESS- UND PRÄCISIONS-INSTRUMENTE.

Ein Leitfaden der elektrischen Messkunde

von

Arthur Wilke.

Mit 65 Abbildungen.

Zweite Auflage.



WIEN. PEST. LEIPZIG.
A. HARTLEBEN'S VERLAG.
1884.

Alle Rechte vorbehalten.

Druck von Friedrich Jasper in Wien.

77539
MAR 23 1904
TNF
.W65

6969745

Vorwort.

In dem vorliegenden Bande der »Elektrotechnischen Bibliothek« bietet der Verfasser dem technischen Publikum einen Leitfaden der elektrischen Messkunde, deren mehr und mehr wachsende Bedeutung eine Vertrautheit mit elektrischen Messungen zu einer unumgänglichen Nothwendigkeit für den Elektrotechniker macht. Den Bedürfnissen der Praxis Rechnung tragend, ist in den Leitfaden nur das aufgenommen, was einerseits als nothwendig, andererseits als hinreichend gelten muss. Man wird daher nicht erwarten, in dem Buche einen Katalog sämmtlicher Mess-Instrumente zu finden, deren Beschreibung Folianten anfüllen könnte. Aus der überaus grossen Anzahl jener Instrumente sind daher nur solche ausgewählt, die in die Praxis allgemein eingeführt sind und sich bewährt haben. In gleicher Weise wurde auch unter den Messmethoden, welche den Gebrauch jener Instrumente lehren, eine Auswahl getroffen, so dass man für alle in der Praxis vor-

kommenden Fälle Auskunft finden wird, ohne durch einen Ueberfluss in Verlegenheit gesetzt zu werden. Der Verfasser kann es sich nicht versagen, an dieser Stelle seinen besonderen Dank dem Herrn Verleger auszusprechen, der in so liberaler Weise für die Ausstattung des Werkes Sorge getragen hat. Hoffentlich gelingt es dem Buche, sich die Gunst seiner Leser zu erwerben.

Arthur Wilke.

Inhalt.

Illustrations-Verzeichniss.

Index.

Namens-Verzeichniss.

Elektrische Einheiten.

Maass-Einheiten, welche zu elektrischen Messungen dienen.

I. Die absoluten oder C. G. S. (Centimeter-Gramm-Secunde-) Einheiten.

1. Längeneinheit: 1 Centimeter.

2. Zeiteinheit: 1 Secunde.

3. Krafteinheit: Die Krafteinheit ist diejenige Kraft, welche für eine Secunde lang auf eine frei bewegliche Masse eines Cubikcentimeters Wasser (4^0 Cels.) wirkend, dieser Masse eine Geschwindigkeit von 1 Centimeter per Secunde verleiht.

4. Die Arbeitseinheit ist die Arbeit, welche von der Krafteinheit verrichtet wird, wenn dieselbe die Entfernung von 1 Centimeter zurücklegt. Diese Einheit ist in Paris = 0·00101915 Centimeter-Gramm, oder mit andern Worten, um das Gewicht eines Grammes einen Centimeter hoch zu heben, sind 980.868 Krafteinheiten nöthig.

5. Die Einheit der elektrischen Quantität ist diejenige Quantität von Elektricität, welche auf eine gleich grosse Quantität, die einen Centimeter weit entfernt ist, eine Kraft gleich der Krafteinheit ausübt.

6. Die Einheit des Potentials oder der elektromotorischen Kraft existirt zwischen zwei Punkten, wenn die Einheit der elektrischen Quantität bei ihrer Bewegung von dem einen Punkte zum andern die Krafteinheit gebraucht, um die elektrische Abstossung zu überwinden.

7. Die Widerstandseinheit ist die Einheit, welche nur einer Quantitätseinheit den Uebergang zwischen zwei Punkten, zwischen welchen die Potentialeinheit existirt, in einer Secunde gestattet.

II. Die sogenannten **praktischen** Einheiten für elektrische Messungen.

1. Weber, Einheit der magnetischen Quantität $= 10^8$ C. G. S. Einheiten
2. Ohm [1] » des Widerstandes $= 10^9$ » »
3. Volt [2] » der elektromotor. Kraft $= 10^8$ » »
4. Ampère [3] » » Stromstärke $= 10^{-1}$ » »
5. Coulomb [4] » » Quantität $= 10^{-1}$ » »
6. Watt [5] » » elektr. Arbeit $= 10^7$ » »
7. Farad » » Capacität $= 10^{-9}$ » »

[1]) 1 Ohm ist gleich 1·0493 Siem.-Einh. und etwa gleich dem Widerstande von 48·5 Meter reinen Kupferdrahtes von einem Durchmesser von 1 Mm. bei einer Temperatur von 0° Celsius.

[2]) Ein Volt ist 5—10% weniger als die elektromotorische Kraft eines Daniell'schen Elementes.

[3]) Der Strom, welcher durch die elektromotorische Krafteinheit die Widerstandseinheit in einer Secunde zu durchfliessen im Stande ist, ist = 1 Amp.

[4]) Coulomb heisst jene Quantität der Elektricität, welche per Secunde ein Ampère giebt.

[5]) 1 Watt = Ampère × Volt. 1 H. P. (horse power) = $\frac{\text{Amp.} \times \text{Volt}}{746}$

1 Cheval de vapeur = $\frac{\text{Amp.} \times \text{Volt.}}{735.}$ = P. S. (Pferdestärke.)

Widerstandseinheiten.*)

Name der Einheit	CS^{-1}	Ohm	Siemens	Deutsche Meile Draht 4 mm.	Franz. Meile Draht 7mm.	Engl. Meile Kupferdr. 1·6 mm.
CS^{-1}	1	10^{-9}	$1,05 . 10^{-9}$	$18 . 10^{-12}$	$105 . 10^{-12}$	$74 . 10^{-12}$
Ohm	10^9	1	1,05	0,018	0,105	0,074
Siemens	$95 . 10^7$	0,95	1	0,017	0,1	0,071
Deutsche Meile	$57 . 10^9$	57	60	1	6	4,26
Franz. Meile	$95 . 10^8$	9,5	10	0,17	1	0,71
Engl. Meile	$13414 . 10^6$	13,414	14,12	0,235	1,41	1

Stromeinheiten.*)

Name der Einheit	CGS	Ampère	Daniell-Siemens	Jacobi per Min.	Silber mg per Min.	Kupfer mg. per Min.
CGS	1	10	8·5	105·2	676·5	198·6
Ampère	0·1	1	0·85	10·52	67·65	19·86
Daniell : Siemens	0·117	1·17	1	12·31	78·95	23·23
Jacobi	0·958	0·095	0·082	1	6·4	1·89
Silber mg	0·148	0·015	0·013	0·156	1	0·294
Kupfer mg	0·502	0·050	0·043	0·529	3·41	1·

*) Uppenborn, IV. B. 7.

Ausser den von W. Thomson vorgeschlagenen und vom Pariser Congress angenommenen Centimeter-Gramm-Secunde-(C. G. S.)Einheiten stehen noch im Gebrauch: die von der British Association (B. A.) benützten Meter-Gramm-Secunde-(M. G. S.) Einheiten und die von Gauss-Weber angegebenen Millimeter-Milligramm-Secunde-(M. M. S.) Einheiten; wir bringen nachstehend eine übersichtliche Zusammenstellung, welche auch die Unterabtheilungen enthält.

Bezeichnung der elektrischen Maasseinheiten.	C. G. S.	M.G.S.	M.M.S.	Willkürl. E.
Widerstand.				
Megohm	10^{15}	10^{13}	10^{16}	
Ohm	10^{9}	10^{7}	10^{10}	1.0493 S.-E.
Mikrohm	10^{3}	10	10^{4}	
Elektromotorische Kraft.				
Megavolt	10^{14}	10^{11}	10^{17}	
Volt (Volta)	10^{8}	10^{5}	10^{11}	0·9 D.-E.
Mikrovolt	10^{2}	10^{-1}	10^{4}	
Stromstärke.				
Megoampère	10^{5}	10^{4}	10^{7}	
Ampère Farad per Secunde .	10^{-1}	10^{-2}	10	10·52Jacobi-E.
Mikroampère	10^{-7}	10^{-8}	10^{-5}	
Capacität.				
Farad (Faraday)	10^{-9}	10^{-7}	10^{-10}	
Mikrofarad	10^{-15}	10^{-13}	10^{-16}	

I.
Allgemeines über die elektrischen Messungen.

1. Vom Mass und Messen überhaupt.

Messen ist zahlenmässiges Vergleichen, wobei die zu vergleichenden Objecte auf ein Einziges ihrer Art bezogen werden und festgestellt wird, wie oft dieses Letztere in dem zu messenden enthalten ist. Die Bedeutung des Messens liegt vor Allem in der Genauigkeit und Leichtigkeit, mit welcher Objecte gemessen, und gemessene Objecte mit einander verglichen werden können. Eine weitere hohe Bedeutung erhält das Messen dadurch, dass wir die Masse bequem und sicher fixiren, an Andere übermitteln und das gemessene Object an ganz anderen Orten und zu anderen Zeiten mit grösster Genauigkeit reproduciren können. Darum bezeichnet jede weitere Einführung des Messens einen Culturfortschritt, welcher so manches Dutzend historischer Staats-Actionen aufwiegt.

Das Messen, der zahlenmässige Vergleich, hat die Existenz eines Objectes, auf das alle zu messenden be-

zogen werden, zur Voraussetzung. Nun ist offenbar, dass mit der Veränderung dieses Grund-Objectes — wir heissen es »die Einheit« — auch alle seine Beziehungen zu anderen Objecten sich ändern. Es folgt daraus, dass für irgendwelche Benutzung von Messungen die zu Grunde gelegte Einheit dieselbe sei, welche bei den Messungen gedient hat. Dieses Erforderniss mag als ein ziemlich einfaches erscheinen, in Wirklichkeit ist es aber die Hauptschwierigkeit bei allem Messen. Denn wenn wir bei unseren Messungen auch alle Vergleiche an einer einzigen Einheit vornehmen würden, so würden wir uns doch noch versichern müssen, ob sich nicht diese Einheit selbst im Verlaufe der Messungen geändert habe. Wir müssten also die Einheit selbst messen, d. h. auf eine andere Einheit zurückführen, deren Unveränderlichkeit wir aber auch zu constatiren hätten, kurz, wir gelangen zu der Unmöglichkeit, zur Sicherung unserer Messungen einen unendlichen Process vornehmen zu müssen.

Dies würde alles Messen illusorisch machen, wenn die Veränderung der Einheit eine erhebliche wäre. Wir werden aber unter den vielen Objecten, welche sich uns als geeignet zu Einheiten darbieten, immer solche wählen können, welche für absehbare Zeiten als unveränderliche gelten dürfen.

Eine Bedingung für die Einheit ist, wie wir aus unserer Definition des Messens ersehen, dass die Einheit von derselben Art, wie das zu messende Object sei. — Nun giebt es unzählig viele Arten und demgemäss auch unzählig viele Einheiten, und wir würden nur wenig Nutzen aus den grossen Vorzügen der Massbestimmung ziehen können, wenn wir die Arten nicht auf einander

zurückführen könnten. Für die physikalischen Messungen ist es aber ein Glück, dass, so zahlreich und vielgestaltig auch die physikalischen Erscheinungen sein mögen, sie doch auf wenige zurückgeführt und als Sonderfälle dieser letzteren betrachtet werden können. Dies geschieht durch das Princip der Einheit der Naturkräfte, gemäss welchem Bewegung, Wärme, Licht, Elektricität und Magnetismus nur verschiedene Formen eines und desselben sind, das wir »Kraft« heissen. Mittelst dieses Principes können die Einheiten jener Formen auf eine derselben zurückgeführt werden, da ein Quantum der einen Form immer einem Quantum der anderen äquivalent ist. Diese Ur-Einheit, mittelst deren wir die anderen ausdrücken, heisst die »absolute«, und Messungen, welche in dieser Einheit ausgedrückt sind, heissen »Messungen nach absolutem Masse«. An sich kann die Einheit jeder der obigen Kraftformen als absolute dienen, für jetzt hat man jedoch die Einheiten der bewegenden Kraft, nämlich Länge, Zeit und Gewicht angenommen, weil Längen- und Gewichtsmessungen, da mit dem feinsten Sinnesorgane, dem Auge, ausgeführt, die grösste Sicherheit und Genauigkeit ergeben. Als letzte Einheiten gelten uns somit das Meter, die Secunde und das Gramm; auf diese drei suchen wir alle Messungen zurückzuführen. Das ist jedoch im Allgemeinen keine so leichte Sache, weil der Zusammenhang der physikalischen Grössen oft ein höchst complicirter ist. In einem Falle sogar ist er noch gar nicht bekannt, nämlich bei dem Lichte, das wir zu unserem Bedauern noch nicht nach absolutem Masse messen können, und für das wir noch immer auf unsichere Einheiten seiner Art angewiesen sind.

2. Die elektrischen Fundamental-Grössen.

Wenden wir uns nun den elektrischen Grössen zu, deren Messung wir im Folgenden kennen lernen sollen, so finden wir, dass sich dieselben auf drei Fundamental-Grössen zurückführen lassen, die in einem einfachen Zusammenhange stehen. Es sind dies die Stromstärke, der Widerstand und die elektromotorische Kraft. Die wichtigste unter ihnen ist die Stromstärke, weil auf Messung dieser die Messungen der anderen zurückführen.

Die Stromstärke oder Intensität ist das Verhältniss der durch einen Querschnitt des Leiters tretenden Elektricitätsmenge zu der Zeit, während welcher sie den Querschnitt passirt. Diese Stromstärke hängt unter anderem von der Beschaffenheit des Leiters ab, welcher, je nach seiner Natur, die Elektricitätsmenge in kürzerer oder längerer Zeit durchleitet.

Dieses Verhalten des Leiters bezeichnet man als die Leitungsfähigkeit desselben. Als Ursache des veränderlichen Verhältnisses nimmt man an, dass die Leiter dem Durchtreten der Elektricität einen grösseren oder geringeren Widerstand entgegensetzen, und dieser Widerstand ist wegen seiner grossen Bedeutung als zweite Fundamental-Grösse anzusehen. Während nun der Widerstand sich der Bewegung der Elektricität entgegenstellt, existirt eine dritte Grösse, welche die Bewegung der Elektricität veranlasst, welche also eine dem Widerstande entgegengesetzte Rolle spielt, indem die Stromstärke um so grösser ist, je grösser die dritte Fundamental-Grösse, die elektromotorische Kraft, ist. Die drei Grössen stehen unter sich in einem einfachen Zusammenhange, dessen Ausdruck als

das Fundamental-Gesetz der Elektricitätslehre angesehen werden muss. Nach seinem berühmten Entdecker trägt es den Namen des Ohm'schen Gesetzes; es wird dargestellt durch den Ausdruck:

$$S = \frac{E}{W}$$

wo S die Stromstärke, E die elektromotorische Kraft und W den Widerstand eines Stromkreises bezeichnet. Durch dieses Gesetz ist uns die Möglichkeit gegeben, aus zwei der Fundamental-Grössen die dritte zu bestimmen. oder auch aus den Beobachtungen der Veränderungen der einen Grösse auf die Veränderungen einer anderen zu schliessen, wenn die dritte unverändert bleibt. Zum Beispiel kann man zwei Widerstände aus den Veränderungen der Stromstärke ermitteln, wenn vorausgesetzt werden kann, dass die elektromotorische Kraft sich während der Beobachtung nicht verändert hat. In dieser Weise führen die elektrischen Messungen im Grunde auf die Messung der Stromstärke zurück, und so ist diese Grösse die bedeutsamste von allen geworden. Zum Glück hat aber auch ihre Messung einen so hohen Grad von Vollendung erfahren, dass wir heute im Stande sind, die elektrischen Grössen mit einer Genauigkeit zu messen, welche selbst die vielgerühmte Präcision der astronomischen Messungen in den Schatten stellt.

Als Einheiten für die drei Fundamental-Grössen sind im Laufe der Zeit eine Reihe von Massen in Vorschlag gebracht worden, und haben einzelne von ihnen eine grössere oder geringere Bedeutung erlangt. Dem Streben unserer Zeit entsprechend, alle Messungen in absolutem Masse auszuführen, hat man neuerdings Einheiten in ab-

solutem Masse in die Elektrik eingeführt, welche mit den Namen dreier, um die Elektricitätslehre hoch verdienter Forscher belegt wurden. So heisst die Einheit für die Stromstärke ein Ampère, die für den Widerstand ein Ohm und die für elektromotorische Kraft ein Volt. Die letztere Bezeichnung ist eine Abkürzung des Namens Volta. Ihr Zusammenhang ist der der Ohm'schen Formel, nämlich:

$$1 \text{ Ampère} = \frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ohm.}}$$

Was die Bedeutung und die Feststellung dieser Einheiten angeht, so soll das Nöthige in einem Anhangscapitel gesagt werden. Die Hauptschwierigkeit hierbei liegt in dem verwickelten Verhältnisse, in welchem die elektrischen Erscheinungen mit ihren mechanischen Wirkungen stehen, welche letztere bei den absoluten Massen als Massstab für die wirkende Elektricität angenommen werden. Diejenigen elektrischen Einheiten, welche früher und auch jetzt noch theilweise im Gebrauche sind, sollen an ihrer Stelle besprochen werden.

3. Allgemeine Uebersicht über die Messmethoden.

Sehen wir zunächst ab von den Messungen elektrostatischer Grössen, so basiren alle elektrischen Messungen auf solchen der Stromstärke. Daher hat auch die Messung dieser Grösse eine ausserordentliche Vervollkommnung erfahren, so dass wir für alle Verhältnisse genügende Methoden besitzen, um allen Anforderungen an Genauigkeit gerecht werden zu können.

Die Zurückführung der elektrischen Messungen auf die der Stromstärke ist dadurch möglich, dass die elektrischen Grössen Factoren der Stromstärke sind, d. h. die Stromstärke hängt von ihnen ab und ändert sich, wenn sich eine oder einige von ihnen ändern. Sollen nun zwei elektrische Grössen derselben Art mit einander verglichen werden, z. B. zwei elektromotorische Kräfte oder zwei Widerstände, so beobachten wir die Stromstärken, die ihnen bei im Uebrigen ungeänderten Umständen zugehören, und können dann aus dem bekannten Zusammenhange zwischen der Stromstärke und den zu messenden Grössen das Verhältniss dieser letzteren zu einander berechnen. So sehen wir aus den Formeln

$$I_1 = \frac{E_1}{W} \qquad I_2 = \frac{E_2}{W}$$

sofort, dass wir aus dem Verhältnisse der Stromstärken I ohne Weiteres das Verhältniss der beiden elektromotorischen Kräfte E finden, wenn die Beobachtungen bei gleichem Widerstande W geschehen.

Eine besondere und ausserordentlich wichtige Methode, die elektrischen Grössen nach ihrem Einflusse auf die Stromstärke zu messen, beruht darauf, dass man eine bekannte und eine unbekannte elektrische Grösse gleicher Art, welche letztere bestimmt werden soll, zu gleichzeitigen Factoren einer Stromstärke macht. Diese wird dann durch beide geändert werden können, und man bringt es durch Abänderung der ersten, der bekannten Grösse dahin, dass die Stromstärke verschwindet. Aus der bekannten Grösse lässt sich die unbekannte dann mittelst ihres mathematischen Zusammenhanges finden. Der Vortheil dieser Methode, die wir als Compensations-

Methode bezeichnen können, liegt in dem Umstande, dass die Intensität Null am leichtesten zu bestimmen ist. Im Weiteren werden wir die Benutzung dieser Methode genauer kennen lernen.

Sehen wir nun zu, welche Methoden uns für die Messung der wichtigsten elektrischen Grösse, der Stromstärke, zu Gebote stehen. Es sind ihrer zwei, die wir als die chemische und die dynamische bezeichnen wollen. Beide beruhen darauf, dass mit ihnen die Stromstärke nicht direct gemessen, nicht unmittelbar mit einer Stromstärke-Einheit verglichen wird, sondern dass statt der unmöglichen directen Vergleichung die Wirkungen der Stromstärken mit einander verglichen werden. Bekanntlich nimmt der elektrische Strom unter gewissen Umständen eine andere Form der Kraft an und verwandelt sich in mechanische Kraft, Wärme, Magnetismus oder chemische Kraft. Diese neue Form wird in quantitativer Beziehung abhängig sein von der Stromstärke, und kann, falls sie zu messen ist, als Massstab für die Stromstärke dienen. Von diesen Formen sind Wärme und Magnetismus wegen ihrer schwierigeren Messbarkeit weniger für die Bestimmung der Stromstärke geeignet. Anders dagegen die mechanische und chemische Wirkung des Stromes, welche beide bequeme Mess-Objecte sind, die erstere, weil sie unmittelbar mittelst Länge und Gewicht, die zweite, weil sie leicht aus der Quantität des Stoffes, den sie zersetzt hat, gemessen werden kann.

Bei der chemischen Methode werden wir also den Strom durch eine zersetzbare Lösung während eines bestimmten Zeitraumes leiten und die durch den Strom zersetzten Quantitäten mittelst Wägung bestimmen. Bei

der dynamischen Methode wird der Strom zu einer mechanischen Wirkung gebracht, und diese kann auf doppelte Weise gemessen werden. Entweder wird die Arbeit, welche die vom Strome erzeugte Kraft in der Zeit-Einheit leistet, gemessen, oder das Moment dieser Kraft in der Weise bestimmt, dass irgend ein Körper unter Einwirkung dieser Kraft andere Lagen annimmt, für welche das Moment der Kraft beständig abnimmt, während das Moment einer anderen Kraft, die auch auf den Körper einwirkt, zunimmt. Es wird alsdann der beeinflusste Körper eine Mittellage einnehmen, aus der auf die Kraft des elektrischen Stromes geschlossen werden kann. Hierbei ist es, wie leicht zu verstehen, eine Hauptaufgabe, die Abhängigkeit der beiden Momente möglichst einfach zu gestalten, um so auch eine einfache Beziehung zwischen der Lage und der Stromstärke zu erhalten. In den neueren Mess-Instrumenten ist dieser Zusammenhang so vereinfacht worden, dass die Intensitäts-Aenderungen direct abgelesen werden können. Wie das erreicht ist, werden wir demnächst sehen.

II.

Die Messung der Stromstärke.

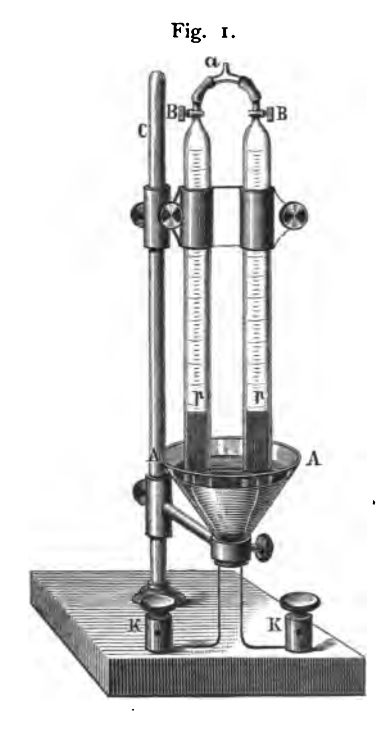
1. Das Voltameter.

Bei der elektrolytischen Wirkung des galvanischen Stromes ist die in einer Zeit-Einheit zersetzte Menge des Elektrolyten proportional der während dieser Zeit-Einheit als constant vorausgesetzten Stromstärke. Wollen wir also die Stromstärke zweier constanter Ströme mit einander vergleichen, so haben wir nur nöthig, die beiden Ströme nach einander eine chemisch zusammengesetzte Flüssigkeit zersetzen zu lassen, und die Quantitäten der geschiedenen Stoffe für die Zeit-Einheit zu bestimmen. Das Verhältniss der respectiven Quantitäten ergiebt unmittelbar das Verhältniss der Stromstärken.

Als Elektrolyten wählt man entweder Wasser oder die Lösung eines Metallsalzes, gewöhnlich des Kupfers oder des Silbers. Wir wollen zunächst die Bestimmung der Stromstärke mittelst Zersetzung von Wasser beschreiben. Der hierbei gebrauchte Mess-Apparat hat den Namen »Voltameter« erhalten, ein Name, der sich dann auf alle Mess-Apparate der chemischen Methode ausgedehnt hat. Fig. 1 zeigt ein solches Voltameter.

Das Stativ *C* trägt das Glasgefäss *AA* und die beiden kalibrirten Glasröhren *BB*, deren untere offene Enden in das mit Wasser gefüllte Gefäss *AA* tauchen. Oben sind die Röhren durch Glashähne verschliessbar.

Fig. 1.



Durch kurze Stückchen Kautschukrohre sind die beiden Rohre oben vereinigt, so dass man durch Saugen an der Oeffnung *a* die Röhren mit Wasser füllen, sowie auch die entwickelten Gase zusammen in einer dritten kalibrirten Röhre auffangen kann. Durch die untere, durch einen Pfropfen verschlossene Oeffnung von *AA* führen

zwei isolirte Drähte, welche mit den Klemmschrauben *KK* in Verbindung stehen. Diese Drähte leiten zu Platinstreifen, welche in die Röhren *BB* hineinragen und als Elektroden bei der Zersetzung dienen. Geht nun ein Strom von der einen Klemmschraube in das mit dieser verbundene Platinblech und von diesem aus durch das zweite Platinblech an die andere Klemmschraube, so wird das Wasser zersetzt werden, und es wird sich am positiven Pole Sauerstoff, am negativen Wasserstoff abscheiden, welche in ihre Cylinder aufsteigen und das Wasser verdrängen. Nach Verlauf einer gewissen Zeit werden sich in beiden Cylindern bestimmte Mengen der beiden Gase angesammelt haben, deren Volumina durch die Kalibrirung der Cylinder bestimmt werden können.

Um die so bestimmten Volumina der beiden Gase als Mass für die Intensität des Stromes zu benutzen, durch den sie erzeugt werden, bedarf es noch der Reduction auf einen bestimmten Druck und auf eine feste Temperatur. Als solche nehmen wir den Druck von 760 Mm. und die Temperatur von 0^0 C. an. Bezeichnet dann V das Volumen eines der erhaltenen Gase in Kubikcentimetern, p den Druck der äusseren Luft in Millimetern und t die Temperatur der Gase in Celsiusgraden, so erhalten wir das reducirte Volumen

$$Vo = \frac{p}{760}(1 - 0{\cdot}0037\, t)\, V$$

War die Zeit, während welcher die Zersetzung stattfand, nicht die Zeit-Einheit, sondern eine beliebige, aber bekannte, so muss das Volumen für die Zeit-Einheit berechnet werden, indem man das Volumen Vo

durch die Anzahl der Zeit-Einheiten (Minuten oder Stunden) dividirt.

So einfach die Messung mit dem Wasser-Voltameter ist, so kann sie doch nicht Anspruch auf eine grosse Verwendbarkeit machen, weil ihr die für viele Messungen erforderliche Genauigkeit abgeht. Der hauptsächliche Grund dieses Mangels liegt in der Schwierigkeit, Volumina genau zu bestimmen. Die Kalibrirung von Röhren ist an sich schon nicht leicht und führt leicht zu Ungenauigkeiten. Durchaus unzuverlässig wird aber die Volumenmessung, wenn es sich um feinere Bruchtheile handelt, die doch bei einer genauen Messung nicht vernachlässigt werden können. Ferner kommt zur Vergrösserung der Ungenauigkeit noch der Umstand hinzu, dass ein Theil der Gase vom Wasser absorbirt wird, und von dem Sauerstoff noch ein weiterer Theil eine chemische Verbindung mit dem Wasser zu Wasserstoffsuperoxyd eingeht. Es beschränkt sich daher im Allgemeinen die Bedeutung der Messungs-Methode mit dem Wasser-Voltameter auf ihre Anwendung bei Vorträgen, wo es bei den Demonstrationen nicht so sehr auf grosse Genauigkeit als vielmehr auf einen sinnfälligen Nachweis der Massverhältnisse ankommt.

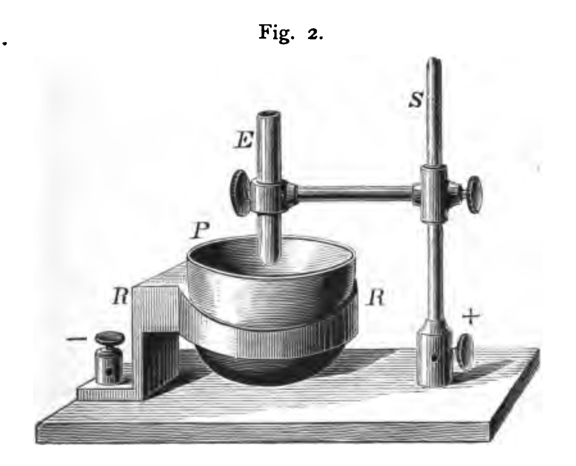
Von den erwähnten Uebelständen frei ist die Methode der Messung mit dem Metall-Voltameter. Hierbei wird ein Metall aus einer Lösung seines Salzes durch den Strom niedergeschlagen, und das niedergeschlagene Metall dann durch Wägen quantitativ bestimmt. Dabei fallen alle Reductionen auf einen Einheitsdruck und eine Einheits-Temperatur fort, und die Menge des niedergeschlagenen Metalls kann auf der Wage auf

das Genaueste bestimmt werden. Eine Bedingung setzt jedoch diese Methode bei ihrer Anwendung voraus, falls man zuverlässige Resultate erhalten will, nämlich dass die Lösung des Metallsalzes keine Beimischung eines anderen Metalles habe. Denn da das Gewicht des Niederschlages pro Zeit-Einheit für jedes Metall ein anderes ist, so wird sofort ein Fehler in der Messung entstehen, wenn wir den Niederschlag des beigemischten Metalles als einen solchen des zur Messung verwendeten ansehen. Wollten wir aber das Gewicht des Niederschlages auf die beiden Metalle repartiren, so müssten wir den Procentsatz der Beimischung kennen, was im Allgemeinen nicht der Fall sein wird. Damit also diese Fehler vermieden werden, wird bei den Messungen mit dem Metall-Voltameter nur chemisch reine Metall-Lösung verwendet. Am geeignetsten erweisen sich die Lösungen von schwefelsaurem Kupferoxyd und salpetersaurem Silberoxyd. Das letztere verdient den Vorzug, weil seine Aequivalentzahl grösser und sein Niederschlag weniger einer Nachoxydation ausgesetzt ist, durch welche ein Mehrgewicht und damit ein Fehler entstehen könnte. Im Folgenden geben wir daher das Verfahren bei Messung der Stromstärke mit dem Silber-Voltameter, mit welchem die Messung durch das Kupfer-Voltameter bis auf die angewendeten Metalle durchaus gleich ist.

Der bei diesen Messungen angewendete Apparat ist in Fig. 2 dargestellt. Ein metallener Ring ist so auf einer Grundplatte befestigt, dass er sich etwa 5 Cm. über dieser befindet. In diesem Ringe, der durch eine Klemmschraube mit dem negativen Pole der Batterie in Verbindung steht, liegt die aus Silber oder Platin ange-

fertigte Schale *P*. Der positive Pol der Batterie führt an das Stativ *S*, welches an einem verschiebbaren Arme die Silberstange *E* trägt, welche bis zu beliebiger Tiefe in die Schale *P* getaucht werden kann. Soweit diese Stange in die Flüssigkeit taucht, ist sie mit dünner Leinwand umhüllt, damit ein Abfallen der abbröckelnden Silberstücke vermieden wird.

Fig. 2.



Um Messungen mit dem Instrumente auszuführen, wird, nachdem das Gewicht der sorgfältig gereinigten Schale genau bestimmt ist, die Silberstange bis auf etwa 1 Cm. Entfernung von der Wandung in die Schale eingesenkt, und diese mit Lösung von salpetersaurem Silberoxyd bis nahe an den Rand gefüllt. Tritt nun der Strom in die Klemmschraube an dem Stative *S* ein und, nachdem er die Lösung durchsetzt hat, durch die Klemmschraube des Ringes wieder aus, so wird sich in der Schale, welche die Kathode bildet, Silber aus der Lösung

niederschlagen. Zugleich werden Sauerstoff und Salpetersäure frei, welche mit dem Silber der Anode, der Stange *E*, aufs Neue salpetersaures Silberoxyd bilden. Dieser Process bleibt ununterbrochen im Gange, solange der Strom geschlossen, und das Silber der Anode noch nicht aufgezehrt ist. Wird nun der Strom nach Verlauf einer bestimmten Zeit unterbrochen, so ergiebt die Gewichtszunahme der Schale das Gewicht des niedergeschlagenen Silbers. Vor dem Wägen muss jedoch der Niederschlag gut ausgewaschen und getrocknet werden, wobei darauf zu achten ist, dass von dem Niederschlage, der in feinen Blättchen an der Schale anklebt, nichts verloren geht. Aus dem Gewichte des Niederschlages kann die Intensität des Stromes ohne weitere Umstände in Ampères angegeben werden. Ein Strom von der Stärke eines Ampère schlägt nämlich 3·96 Gr. Silber in der Stunde nieder. War also die Zeit t der Messung in Stunden angegeben und g das Gewicht des Niederschlages, so erhalten wir für die Stärke des zu messenden Stromes

$$J = \frac{g}{3{\cdot}96\, t} \text{ Ampères.}$$

Die Constante 3·96 ist selbstverständlich empirisch bestimmt worden.

Um einen genügenden Niederschlag zu erhalten, wird man das Silber-Voltameter der Einwirkung des Stromes für eine Dauer von etwa 2—3 Stunden auszusetzen haben, bei schwächeren Strömen auch noch länger, bis zu circa 5 Stunden. Für Ströme, deren Intensität unter $^1/_2$ Ampère oder über 5 Ampères liegt, ist

das Silber-Voltameter nicht mehr geeignet. Für die stärkeren Ströme empfiehlt sich ein Kupfer-Voltameter, das in entsprechend grösseren Verhältnissen gehalten ist. — Die Constante des Kupfers pro Ampère und Stunde ist 1·16.

2. Die dynamische Methode.

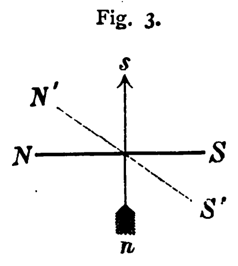
Wir gelangen jetzt zu derjenigen Methode der Intensitätsmessung, welche wegen ihrer allgemeinen und leichten Anwendbarkeit und ihrer schnellen Ausführung von allen Messmethoden für elektrische Grössen die weitaus wichtigste ist, nämlich zu der Messung der Stromstärke nach ihrer dynamischen Wirkung. Bei dieser Methode gilt es, die durch den Strom erzeugte mechanische Kraft zu bestimmen, und hierfür bieten sich uns, wie schon erwähnt, zwei Methoden dar, nämlich die Messung des Drehungsmomentes der Kraft oder der Bestimmung der Arbeit, welche die Kraft in einer Zeit-Einheit verrichtet. Für die exacte Messung ist bis jetzt noch ausschliesslich die erste Methode angewandt worden, deren Grundzüge die folgenden sind:

Ein Magnet oder Solenoid*) kann sich um eine Axe drehen, die senkrecht zu seiner magnetischen Axe ist. Diese magnetische Axe steht senkrecht zu einem magnetischen Felde, das durch den zu messenden Strom erzeugt wird. Das beifolgende Schema (Fig. 3) stellt diese Verhältnisse dar; NS ist der Magnet, ns das

*) D. h. eine von einem Strome durchflossene Drahtspirale, welche sich gerade so verhält wie ein Magnet.

magnetische Feld, die Drehungsaxe des Magneten steht senkrecht zu der Ebene ($NS \times ns$) in dem Kreuzungspunkte von NS und ns. Es wird die magnetische Kraft des Feldes ns, welche durch die Stromstärke erzeugt wird und von der Intensität abhängig ist, ein Drehungsmoment auf NS ausüben, indem sie bestrebt ist NS in die Lage sn zu bringen. Ist eine Gegenkraft vorhanden, welche NS in der entgegengesetzten Richtung zu drehen sucht, so wird der Magnet oder Solenoid NS eine solche Mittellage annehmen, für welche die beiden

Fig. 3.



Drehungsmomente gleich sind. NS ist dann um einen gewissen Winkel von seiner Ruhelage abgelenkt, und die Grösse dieser Ablenkung gestattet einen Rückschluss auf die Stromstärke, wie wir weiterhin sehen werden.

Als Gegenkraft werden der Erdmagnetismus die Torsion und die Schwere benutzt, für deren jeweilige Anwendung die verschiedenen Umstände, unter denen gemessen wird, entscheidend sind. Der Benutzung des Erdmagnetismus liegt folgende Idee zu Grunde: Fällt die Ruhelage des Magnet NS mit dem magnetischen Meridian zusammen, so wird bei einer Ablenkung a des Magneten vom Meridian das von dem

Erdmagnetismus t auf den Magneten ausgeübte Moment proportional sein

$$t \sin a$$

Können wir es nun dahin bringen, dass das Moment, welches das magnetische Feld $n\,s$ auf NS ausübt, ebenfalls proportional ist dem Sinus des Winkels, den $n\,s$ und der Magnet miteinander machen, so wird, da der Sinus dieses Winkels $= \cos a$ ist, das Moment gleich sein

$$R\,i \cos a,$$

wo R eine Constante und i die Stromstärke bedeutet. Wir erhalten dann für die Ablenkung a, bei welcher die beiden entgegengesetzten Momente gleich, und der Magnet somit in Ruhe ist,

$$t \sin a = Ki \cos a,$$

woraus folgt, dass die Stromstärke i gleich ist

$$K \operatorname{tg} a$$

Es gilt mithin der Satz, dass sich für Mess-Apparate der angedeuteten Art die Stromstärken verhalten wie die Tangenten der Ablenkungswinkel. Bei den Spiegel-Galvanometern werden wir sehen, wie wir diese Tangenten und damit die Stromstärken direct ablesen können.

Die Benutzung der Torsion gründet sich darauf, dass die Torsionskraft eines tordirten Fadens oder einer tordirten Feder proportional ist dem Torsionswinkel. Um nun mittelst der Torsion das von dem Strome auf einen Magnet oder Solenoid ausgeübte Drehungsmoment zu bestimmen, dreht man den Magneten in seine Ruhelage zurück, indem man den Aufhängefaden oder eine mit dem Magnet verbundene Feder tordirt. Der tordirte Faden oder Feder sucht dann den Magneten in gleichem

Sinne mit der Torsion zu drehen, während die Richtkraft des Stromes ihn in der entgegengesetzten Richtung zu drehen bestrebt ist. Ist dann die Torsion genau so gross, dass der Magnet wieder in seiner Ruhelage steht, so wirken auf denselben zwei drehende Kräfte, die Torsion in der einen Richtung, die Richtkraft des magetischen Feldes in der anderen. Die letztere wird proportional sein der Stromstärke, da sie nur noch von dieser, nicht aber mehr von der Lage des Magneten, die immer dieselbe, nämlich die Ruhelage, ist, abhängt. Die Torsionskraft ist nach dem oben ausgesprochenen Satze proportional dem Winkel, um welchen der Faden oder die Feder tordirt werden muss, um die Richtkraft zu compensiren. Wir erhalten also die einfache Beziehung:

$$k i = w,$$

wo i die Intensität, w den Torsionswinkel und k eine für jedes Instrument individuelle Constante bedeutet. Für ein und dasselbe Instrument gilt also der Satz, dass sich zwei Stromstärken verhalten wie die Torsionswinkel, die an dem Instrumente gemessen wurden.

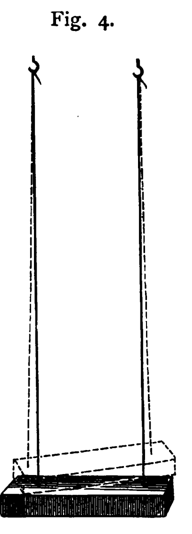
Die Benutzung der Schwere ist im Ganzen weniger gebräuchlich. Am verbreitetsten ist ihre Anwendung bei der bifilaren (deutsch: Zweifaden-) Aufhängung. Hängen wir nämlich einen Stab wagrecht an zwei parallelen, gleichlangen Fäden auf, wie es die beistehende Skizze (Fig. 4) zeigt, so wird der Stab bei einer Drehung um die Axe, welche parallel den Fäden und mitten zwischen ihnen durch den Stab hindurch geht, entsprechend dem Drehungswinkel gehoben. Das Gewicht des Stabes sucht dann diesen wieder in seine Ruhelage zurückzudrehen und giebt somit eine Gegenkraft ab. Der Zusammen-

hang zwischen dieser Gegenkraft und dem Winkel, um welchen der Stab von der Ruhelage abgelenkt, ist

$$M = k \sin v,$$

wo M die Gegenkraft, v den Ablenkungswinkel und k eine Constante bedeutet. Ausser der Schwere wird aber auch noch der Erdmagnetismus auf den Magnetstab wirken, und diese Wirkung wird gleichfalls proportional sin v sein, wenn die magnetische Axe des Stabes in den magnetischen Meridian fiel. Hieraus ergiebt sich für die geschilderten Verhältnisse der Satz, dass bei bifilarer Aufhängung des Magneten das Drehungsmoment der Kraft, die ihn in die Ruhelage zurückzuführen strebt, proportional ist dem Sinus des Ablenkungswinkels*).

Fig. 4.



Eine beschränkte Anwendung der Schwere als messende Gegenkraft findet sich bei der **elektrischen Wage**. An dem einen Arm eines Wagebalkens ist eine Drahtspirale oder ein Magnet befestigt, welche durch eine andere feste Drahtspirale angezogen werden, wenn durch die beiden Spiralen oder im Falle, dass die bewegliche Spirale durch den Magnet ersetzt ist, durch die feste Spirale ein Strom kreist. Der andere Arm des Wagebalkens trägt die Wagschale. Durch Auflegen von Ge-

*) Verwandt mit der bifilaren Aufhängung ist die zuerst von **Zöllner** bei dem Horizontalpendel angewendete **contrafilare** Suspension. Eine Darstellung und Anwendung derselben findet man weiter unten bei den Elektrometern.

wichten auf die Wagschale wird der Wagebalken in der wagrechten Stellung erhalten. Das aufgelegte Gewicht, welches zur Aequilibrirung nothwendig ist, ist proportional der Stromstärke, wenn es sich um die Anziehung zwischen Magnet und fester Spirale, oder proportional dem Quadrate der Stromstärke, wenn es sich um Anziehung der beiden Spiralen handelt, die von demselben Strome durchflossen werden.

Man hat diese Wagen noch dahin vereinfacht, dass man sie nach dem Princip der Schnellwagen mit ungleicharmigem Hebel und feinem Laufgewicht construirt hat. Zu irgend welcher Bedeutung sind sie nicht gelangt.

3. Die Galvanoskope.

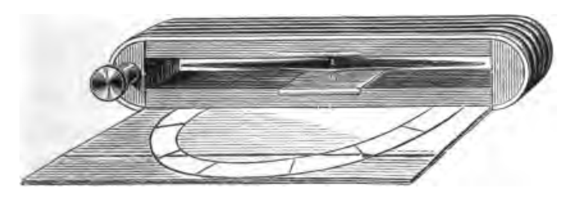
Bevor wir an die Darstellung der eigentlichen Mess-Apparate gehen, wollen wir erst einige Apparate betrachten, deren Zweck nicht so sehr die quantitative Bestimmung der Stromstärke, als vielmehr das Anzeigen der Existenz und der Richtung des Stromes ist. Man bezeichnet derartige Apparate als Galvanoskope zum Unterschiede von den Galvanometern, welche zur wirklichen Messung dienen.

Das primitivste Galvanoskop besitzen wir in unserer Zunge, die in Ermangelung von Besserem uns manchmal die Dienste eines Stromanzeigers leisten kann. Legt man nämlich den Leitungsdraht des einen Poles unter, den des anderen auf die Zunge, so spürt man auf derselben, falls ein genügend starker Strom vorhanden ist, einen eigenthümlichen, höchst charakteristischen Ge-

schmack. Man kann dieser Prüfungsweise eine gewisse Empfindlichkeit zusprechen, denn wir können den Geschmack schon deutlich spüren, wenn wir ein Kupfer- und ein Zinkstäbchen nehmen und die Zunge in angegebener Weise dazwischen klemmen. Bei Prüfungen in dieser Weise ist zu empfehlen, den Stromkreis öfter zu schliessen und zu öffnen, weil so ein etwa vorhandener Unterschied leichter constatirt werden kann.

Fig. 5.





Handelt es sich einfach um den Nachweis der Existenz, Richtung und ungefähren Stärke eines nicht zu schwachen Stromes, so bedient man sich am besten des Batterieprüfers, den wir auch Leitungsprüfer nennen können, weil wir uns mit ihm bequem versichern können, ob eine Leitung auch wirklich leitet. Seine Construction ist die denkbar einfachste. Um ein schmales Holzrähmchen (Fig. 5) sind einige Windungen von starkem übersponnenen Draht gewickelt. Auf der Innenseite der beiden langen Stücke des Holzrähmchens sind in der Mitte zwei Stückchen Messingblech befestigt, deren jedes eine conische Vertiefung hat. In diesen beiden Vertiefungen

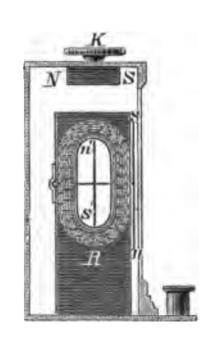
bewegt sich die Stahlaxe des Magneten, der sich also senkrecht zur Ebene der Windungen dreht. Die Enden der Drähte sind an zwei Klemmschrauben geführt, die an dem Holzrähmchen befestigt sind. An dem Holzrähmchen sind ferner zwei Pappstücke befestigt, welche eine Kreistheilung haben. Dieselben sind so zusammengesetzt, dass sie um das Rähmchen zusammengelegt werden können, wie das aus der beistehenden Skizze unmittelbar erhellt. Zusammengelegt kann das Instrumentchen in ein Pappfutteral geschoben und bequem in die Tasche gesteckt werden.

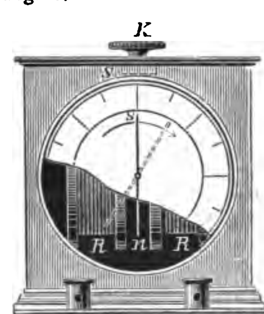
Die beiden Spitzen der Magnetnadel sind verschieden gefärbt, z. B. roth und schwarz, damit man sofort die Richtung des Stromes erkennen kann. Es wird nämlich die eine, sagen wir die rothe, sich bei der Ablenkung derjenigen Klemmschraube, durch welche der Strom eintritt, die andere, die schwarze, dagegen sich der Klemmschraube des Austrittes zuwenden. Die Bestimmung, welche Spitze dem positiven, resp. negativen Pole zuweist, vollführt man am besten, indem man das Instrument an ein Element anlegt.

Ein empfindlicheres Instrument, das für stationären Gebrauch bestimmt ist und sich bequem überblicken lässt, ist das Vertical-Galvanoskop, das eine weitverbreitete Anwendung in den Telegraphenbureaux gefunden hat. Seine Construction ist folgende: Die beiden Holzrähmchen $R R$ (Fig. 6) tragen eine Anzahl Windungen von übersponnenem Draht. In dem Hohlraume des Rähmchens kann eine Magnetnadel $N' S'$ um eine horizontale Axe schwingen. Die Schwingungsebene der Nadel ist vertical zur Ebene der Windungen; die Nadel wird somit, wenn

ein Strom die Windungen durchkreist, von ihrer Ruhelage abgelenkt werden. Die Axe des Magneten ist über die Vorderseite des Rähmchens hinaus verlängert und trägt an ihrem Ende eine zweite Magnetnadel, welche der ersten parallel ist, deren magnetische Pole aber entgegengesetzt liegen. Hat also diese letztere in der Ruhelage oben den Nord- und unten den Südpol, so hat die äussere Nadel oben Süd- und unten Nordpol. Der Zweck

Fig. 6.





dieser Anordnung, der wir noch öfter begegnen werden, ist ein doppelter. Zunächst ist ein solches Nadelpaar, bei gleicher Stärke des Magnetismus in jeder Nadel, unempfindlich gegen den Einfluss des Erdmagnetismus, da der eine Pol *N* ebenso stark angezogen, als der Pol *S'* abgestossen wird, so dass sich beide Wirkungen aufheben. Weiterhin wird aber auch eine stärkere Wirkung der Kreisströme auf die Nadel erzielt. Es wird nämlich eine Magnetnadel durch einen über sie hingeführten Strom in dem einen Sinne, durch einen unter ihr liegenden gleicher Richtung, in dem anderen Sinne abgelenkt. Die innere Nadel wird also durch den in den

Windungen circulirenden Strom in einer bestimmten Richtung abgelenkt; die äussere Nadel würde, falls sie gleiche Pole mit der inneren hätte, in dem entgegengesetzten Sinne abgelenkt werden. Da aber ihre Pole die entgegengesetzten der inneren Nadel sind, so wird sie mit dieser in gleicher Richtung abgelenkt und verstärkt somit den Ausschlag. Man heisst ein in dieser Weise angeordnetes Nadelpaar ein astatisches.

Auf der vorderen Seite trägt das Holzrähmchen eine auf Papier gedruckte Kreistheilung, an welcher der Ausschlag abgelesen werden kann. Das Ganze steht in einem Holzkästchen, das vorne durch eine Glasscheibe verschlossen ist. Noch bleibt eine kleine Vorrichtung zu erwähnen, welche den Zweck hat, die Nadel bei Ruhelage in der Verticalen zu erhalten. Die Nadeln sind nämlich gerade so weit bis zum Gleichgewicht gebracht, dass für den einen Nadelarm ein kleines Uebergewicht übrig bleibt, das gerade genügt, die Nadeln in die Verticale zu stellen, wenn sie nicht durch einen Strom afficirt werden. Nun ist es nur schwer zu erreichen, die Nadeln vollkommen astatisch zu machen; es wird vielmehr stets eine grössere oder geringere Einwirkung der Horizontal-Componente des Erdmagnetismus sich geltend machen können, welche die Nadeln aus ihrer verticalen Lage ablenkt. Um diesen Einfluss zu compensiren, ist an der Decke des Holzkästchens ein sogenannter Richtmagnet angebracht. — Durch die Mitte der Decke führt eine kurze Axe *e*, welche an der Aussenseite einen Knopf zum Drehen, an der inneren Seite einen kurzen, etwa 3 Cm. langen Magnet trägt. Je nachdem man durch Drehung den Südpol des Richtmagneten auf die eine

oder die andere Seite des Poles N' der inneren Nadel bringt, kann man dem ganzen Nadelsystem eine Ablenkung nach rechts oder links ertheilen und so den Einfluss des Erdmagnetismus neutralisiren.

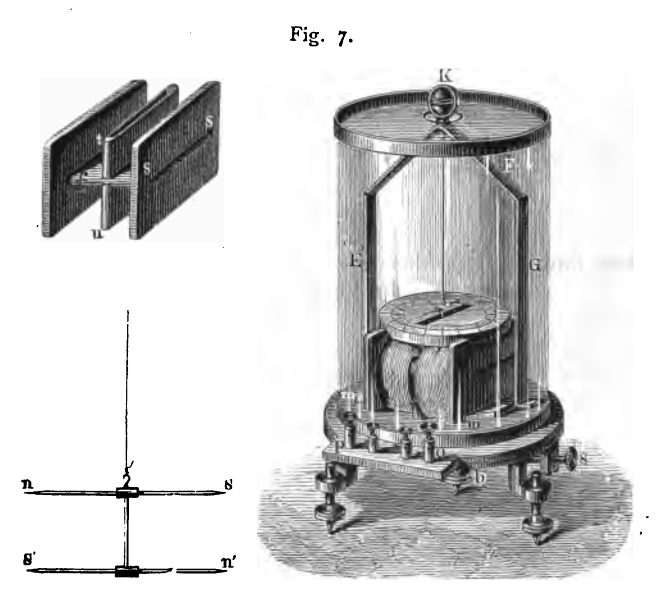
4. Der Multiplicator.

Seiner Natur nach zu den Galvanoskopen gehörig, wegen seiner abweichenden Construction, seiner ausserordentlichen Empfindlichkeit und seiner wissenschaftlichen Bedeutung ein durchaus eigenartiges Instrument ist der Multiplicator. Auf einer kreisförmigen Grundplatte (Fig. 7), welche durch drei Stellschrauben horizontal gestellt werden kann, liegt das Holzrähmchen, welches die Drahtwindungen trägt. Dieses Rähmchen ist in Fig. 7 dargestellt. Die beiden Seitenwände *s s* und die hohle Zwischenwand *t* sind durch das hohle Verbindungsstück *f* zu einem Ganzen vereinigt. In dem horizontalen Spalte von *f* schwingt die eine Nadel eines astatischen Nadelpaares, welche durch den verticalen Spalt von *t* eingelassen werden kann. Die Zwischenräume zwischen der Zwischenwand *t* und den Seitenwänden sind mit Drahtwindungen ausgefüllt. Auf der oberen Seite trägt das mit Draht umwundene Rähmchen eine Kreistheilung, die in der Mitte einen Schlitz zum Einsenken der inneren Nadel in die Spalte *t* hat; zwei kleine Stiftchen, welche an den um 90^0 vom Nullpunkte entfernten Theilstrichen auf der Theilung befestigt sind, verhindern, dass die Nadel sich zu weit bewegt.

Auf der Grundplatte steht ferner der Rahmen *E F G*, dessen Ebene senkrecht zur Ebene der Drahtwindungen

ist. Derselbe trägt den Knopf *k*, der die Mutter einer Schraubenspindel bildet, an welcher das astatische Nadelpaar hängt. Durch Drehung des Knopfes kann das Nadelpaar ein wenig gesenkt oder gehoben werden. Die Nadeln hängen an einem Coconfaden, der an der

Fig. 7.



Schraubenspindel befestigt ist. Die beiden Nadeln selbst sind in Fig. 7 dargestellt. Das Ganze ist schliesslich mit einer Glasglocke bedeckt, welche oben durchbohrt ist, um den Knopf *k* hindurch zu lassen. Ausserhalb dieser Glasglocke stehen auf der Grundplatte vier Klemmschrauben, von denen je zwei mit den beiden Enden eines Drahtes in Verbindung stehen, nämlich die beiden äusseren mit einem Drahte von 1 Mm. Dicke,

der in etwa 100 Windungen auf das Rähmchen gewunden ist, während die beiden inneren zu einem feineren Drahte führen, der in etwa 10000 Windungen das Rähmchen umgiebt. Die Verbindung der Grundplatte mit den Stellschrauben ist keine feste, vielmehr tragen diese letzteren einen Conus, auf dem die Grundplatte aufsitzt und sich drehen lässt. Die Schraube *s* dient dazu, die Grundplatte nach erfolgter Einstellung an den Conus zu pressen, und so festzustellen.

Die Anzahl der bei einem Multiplicator angewendeten Drahtwindungen und die Dicke des benutzten Drahtes ist je nach den verschiedenen Zwecken eine sehr verschiedene. Während man z. B. bei dem Nachweis der in einer Thermo-Kette auftretenden Ströme wegen des geringen Widerstandes solcher Ketten nur eines Multiplicators von etwa 100 Windungen starken Drahtes bedarf, erfordern die physiologischen Versuche die Anwendung von Multiplicatoren, die bis zu 30.000 Windungen vom allerfeinsten Drahte haben.

Um den verschiedenen Bedürfnissen in dieser Richtung mit einem Instrumente, wenigstens innerhalb gewisser Grenzen, entsprechen zu können, wickelt man häufig den Draht in einzelnen (4—8) Partien auf, deren Enden man zu gesonderten Klemmschrauben führt. Man hat es dann in seinem Belieben, die einzelnen Drähte ganz oder gruppenweise hinter- oder nebeneinander zu schalten und so den Widerstand den verschiedenen Spannungen anzupassen.

Durch eine kleine Abänderung in der Anordnung wird aus dem Multiplicator ein neues eigenartiges Instrument, das Differential-Galvanometer, das insbe-

sondere für Widerstandsmessungen von grossem Werthe ist. Bei diesem Apparate sind die Drahtwindungen in zwei Partien getheilt, die beide gleiche Widerstände haben und so gewickelt sind, dass jede die Magnetnadel mit der gleichen Kraft zu drehen sucht, der Sinn der Drehung bei beiden aber entgegengesetzt ist. Circuliren dann in beiden Drahtpartien Ströme von gleicher Intensität, so werden zwar beide Partien eine Kraft auf die Nadel ausüben, die beiden Kräfte heben aber einander auf, und die Nadel bleibt in der Null-Lage liegen. Umgekehrt ist die Null-Lage der Nadel ein Anzeichen, dass die in den beiden Partien circulirenden Ströme einander gleich sind.

Den beiden Bedingungen der Construction zu genügen, nämlich die Widerstände der beiden Drahtpartien einander gleich und die Wirkungen auf die Nadel gleich und entgegengesetzt zu machen, wird man am zweckmässigsten, wie im Folgenden angegeben, verfahren.

Man mache die beiden Hälften des Holzrahmens, welche die rechte und linke (von der Null-Lage der Nadel gerechnet) Partie der Windungen tragen, selbständig, indem man zwei Rahmen ohne Mittelwand und von der halben Breite des in Fig. 7 dargestellten Rahmens macht. Diese beiden Rahmen können durch Schrauben den astatischen Nadeln genähert oder von ihnen entfernt werden. Sie werden dann mit Drähten von gleicher Stärke und gleichen Widerständen bewickelt. Es entstehen so zwei Spulen, deren Enden man an Klemmschrauben führt, welche als Eingangs- und Ausgangs-Klemmschrauben bezeichnet werder Hierbei hat man Acht, dass die Bezeichnung der Klemmschrauben zu entgegengesetzten Stromrichtungen in den beiden Spulen und somit

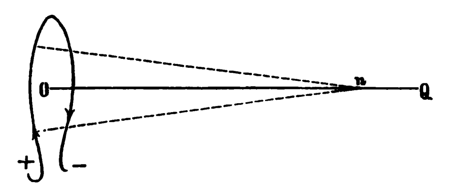
zu entgegengesetzten Wirkungen auf die Nadeln führen. Man verbinde nun sowohl die beiden Eingangs- als auch die beiden Ausgangs-Klemmen mit einander, und führe einen Strom bei den Eingangsklemmen ein und bei den anderen heraus. Da die Widerstände in beiden Spulen gleich sind, so werden auch die Stromstärken in beiden Spulen gleich sein, gemäss des Satzes, dass die Stromstärken sich in Zweigströmen umgekehrt verhalten, wie die Widerstände der Zweige. Nunmehr kann man durch die Stellschrauben die Stellung der beiden Spulen so reguliren, dass ihre Wirkungen an der Nadel einander aufheben. Das Instrument erfüllt dann die verlangten Bedingungen und kann als Differential-Galvanometer gebraucht werden. Wie man leicht sieht, verwandelt eine kleine Aenderung in der Verbindung der Klemmschrauben untereinander das Instrument in einen gewöhnlichen Multiplicator.

5. Die Tangenten-Bussole.

Wenden wir uns nunmehr den eigentlichen Mess-Instrumenten zu, so wird es für ein näheres Verständniss derselben nothwendig sein, in eine kurze Erörterung des Zusammenhanges zwischen Stromstärke und erzeugter Ablenkung einzugehen, da die Ablenkung zum Massstabe der Intensität gemacht wird. Der allgemeine Fall dieses Zusammenhanges würde zu sehr verwickelten Verhältnissen führen. Unter besonderen Umständen kann aber der Ausdruck, welcher den Zusammenhang angiebt, dadurch vereinfacht werden, dass man einzelne Glieder, welche wegen ihrer Geringfügigkeit das Endresultat nicht

beeinflussen, kurzweg vernachlässigt. Aufgabe der Construction wird es alsdann, jenen besonderen Umständen Rechnung zu tragen, und die Anordnung der Theile des Instrumentes so zu wählen, dass jene vernachlässigten Grössen auch stets vernachlässigt werden durften. Eine eingehende Darstellung der angedeuteten Verhältnisse an dieser Stelle zu geben, müssen wir uns versagen und glauben in dem Sinne der Leser zu handeln, wenn wir in unserer Darstellung nur die Hauptmomente hervorheben, für genauere Auskunft aber auf die grösseren

Fig. 8.



Werke von Wüllner, Mousson, v. Feilitzsch und Wiedemann verweisen.

In der Axe OQ (Fig. 8) eines Kreisstromes, welche senkrecht auf der Ebene des Kreises und in seinem Mittelpunkte steht, liegt ein magnetisches Theilchen n. Dasselbe wird von den einzelnen Theilen des Kreisstromes, zu denen es symmetrisch liegt, in gleicher Weise beeinflusst, und die Gesammtwirkung des Stromkreises auf das magnetische Theilchen ist je nach der Richtung des Stromes eine Anziehung oder Abstossung. Liegt nun an der gleichen Stelle ein magnetisches Theilchen von entgegengesetztem Magnetismus, so wird es die gleiche aber entgegengesetzte Wirkung erfahren. Sind beide Theilchen vereinigt, so

wird auf dieselben ein Drehungsmoment ausgeübt. Denken wir uns nun anstatt der beiden Theilchen einen Magnet in *n* aufgehangen, dessen Dimensionen so klein sind, dass wir ihn in allen seinen Theilen als gleich weit von dem Kreisstrom entfernt ansehen können, ohne eine zu grosse Ungenauigkeit zu begehen, so wird die Kraft, mit welcher der Kreisstrom den Magnet aus seiner, zur Ebene des Kreisstromes parallelen Lage zu drehen sucht, proportional der Stromstärke sein. Steht der Kreisstrom im magnetischen Meridian, so werden zwei Kräfte auf den Magnet wirken, der Erdmagnetismus und der Kreisstrom. Die Wirkung des Erdmagnetismus wächst mit der Ablenkung der Nadel aus dem magnetischen Meridiane und zwar wie der Sinus des Winkels, den die Nadel mit dem Meridiane bildet. Die Wirkung des Kreisstromes nimmt aber mit der Ablenkung ab, und zwar wie der Cosinus des Ablenkungswinkels. In einer gewissen Lage, welcher der Winkel t entspricht, werden die beiden Gegenkräfte einander gleich sein. Alsdann wird, wenn T die Wirkung des Erdmagnetismus bei einer Ablenkung von 90^0 bedeutet, diese Wirkung gleich sein

$$T \sin t$$

Die Wirkung des Kreisstromes ergiebt sich aus dem Vorhergehenden, wenn S die Wirkung bei einer Ablenkung von 0^0 bedeutet, gleich

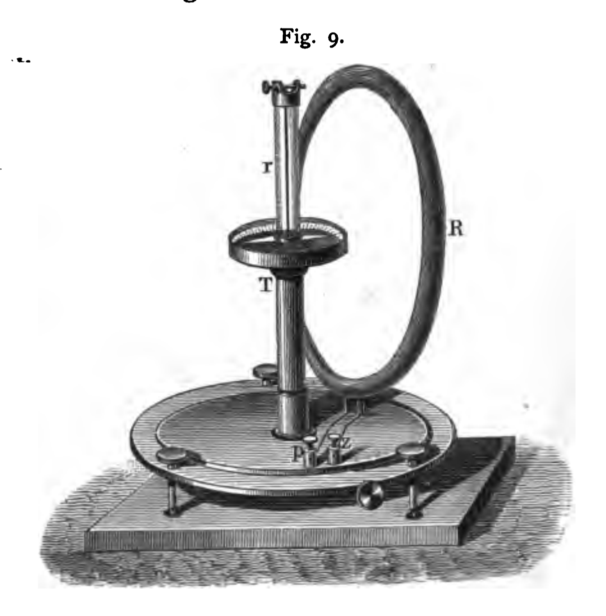
$$S \cos t$$

Hieraus folgt $S = T \operatorname{tg} t$, und da wir oben sahen dass S proportional der Intensität ist, erhalten wir den Satz:

Die Intensität eines Kreisstromes, welcher im magnetischen Meridian steht und auf eine, in seiner Axe aufgehängte kleine Magnetnadel wirkt, ist proportional der Tangente des Ablenkungswinkels.

Auf dieses Gesetz gründet sich die Construction eines vielfach angewendeten Mess-Instrumentes zur Be-

Fig. 9.



stimmung und Vergleichung von Stromstärken. Es trägt den Namen Tangenten-Bussole wegen der im obigen Satze ausgesprochenen Beziehung zwischen Stromstärke und Ablenkungswinkel. Seine Construction ist im Folgenden dargestellt. In der durch drei Stellschrauben verstellbaren Platte (Fig. 9) steht die Messingsäule, die mit einem Zapfen

in einer conischen Ausbohrung der Platte sitzt und in derselben gedreht werden kann. Auf der Säule ist die flache cylindrische Büchse *T* befestigt, in welcher die Magnetnadel schwingt. An dem inneren Rande der Büchse ist in halber Höhe der Ring mit der Theilung angebracht. Oben ist die Büchse durch einen Glasdeckel geschlossen, auf dem, concentrisch mit dem Theilungskreise, eine Glasröhre *r* steht, welche oben durch einen Kopf geschlossen ist. Derselbe ist genau über dem Mittelpunkt des Theilungskreises durchbohrt und trägt aussen eine kleine Rolle, um welche der Coconfaden der Magnetnadel geschlungen ist, sodass durch Drehung der Rolle der Coconfaden angezogen oder nachgelassen werden kann. Der an dem Coconfaden schwebende Magnet besteht aus einem kurzen Stückchen Stahl, das an seinen Enden als Verlängerung feine Nadeln von Aluminium trägt, deren Spitzen bis an den Theilkreis reichen. Das Aluminium empfiehlt sich wegen seiner Leichtigkeit, es kann aber selbstverständlich durch ein anderes Material ersetzt werden. Auf dem Boden der Büchse *T* bringt man zuweilen einen Spiegel an, womit bezweckt wird, das Auge in eine genau senkrechte Stellung über der Nadel beim Ablesen zu bringen, indem man dabei so auf die Nadel sieht, dass Nadel und Spiegelbild derselben sich decken.

Der zweite Theil der Bussole ist der Leiter des Kreisstromes. Man brachte denselben früher über der Mitte des Theilungskreises an, während man ihn jetzt, aus weiterhin zu erörternden Gründen, excentrisch stellt, wie das unsere Figur zeigt. An der Messingsäule befestigt, und also mit ihr drehbar, ist eine runde Scheibe. Diese trägt isolirt den starken Metallring *R*. Derselbe

ist unten aufgeschnitten und der entstandene Ausschnitt durch eine gut isolirende Masse (Hartgummi) ausgefüllt.

An den beiden, an dem Ausschnitte zusammenstossenden Enden trägt der Metallring zwei Klemmschrauben, welche zur Ein-, resp. Ausführung des Stromes dienen. Der äussere Mantel des Ringes ist conisch abgedreht und bildet einen Theil eines Kegelmantels. Die Spitze des Kegels liegt in dem Mittelpunkte der Magnetnadel, die Höhe desselben ist gleich ein Viertel der Basis und somit seine Oeffnung gleich $63^0\, 26'$. In der Oberfläche ist ein Schraubengang von einigen Umgängen eingedreht, welcher die Windungen eines starken Drahtes aufzunehmen bestimmt ist. Die beiden Enden dieses Drahtes sind an zwei weitere Klemmschrauben geführt, welche auf der drehbaren Scheibe sitzen. — Der Stromkreis des dicken Leiters ist für starke, derjenige der Windungen für schwächere Ströme bestimmt. Um das Instrument zu gebrauchen, stellt man die Büchse mit dem Theilkreis horizontal und dreht dann die Säule soweit, bis der Leiterring in dem Meridian und seine Ebene mit der Magnetnadel parallel steht.

Wie wir oben sahen, ist das bei der Tangenten-Bussole in Anwendung kommende Tangenten-Gesetz nur unter der Voraussetzung giltig, dass die Dimensionen des Magnetes so klein gegen die des Stromkreises sind, dass die Wirkung des Stromkreises als für alle Punkte des Magnetes gleich angesehen werden kann. Diesen Bedingungen ist aber nicht gänzlich zu genügen, und werden daher in der Proportionalität zwischen Stromstärke und Tangenten der Ablenkungswinkel Abweichungen entstehen, die mit den Ablenkungswinkeln wachsen. Um

diese Abweichungen möglichst zu vermeiden, stellte Gaugain den Stromkreis excentrisch auf und legte die einzelnen Windungen auf einen Kegelmantel, dessen Oeffnungswinkel die Tangente 2 hatte. Er war zu dieser Construction auf rein experimentellem Wege gelangt. Bravais wies dann später mit Hilfe des höheren Calcüls die Richtigkeit dieser Anordnung nach. Nichtsdestoweniger wird auch dieses Instrument bei grösseren Ablenkungen unzuverlässig.

Diese Mängel der Tangenten-Bussole veranlassten Pouillet und nach ihm Poggendorff zur Construction eines anderen Mess-Instrumentes, der Sinus-Bussole.

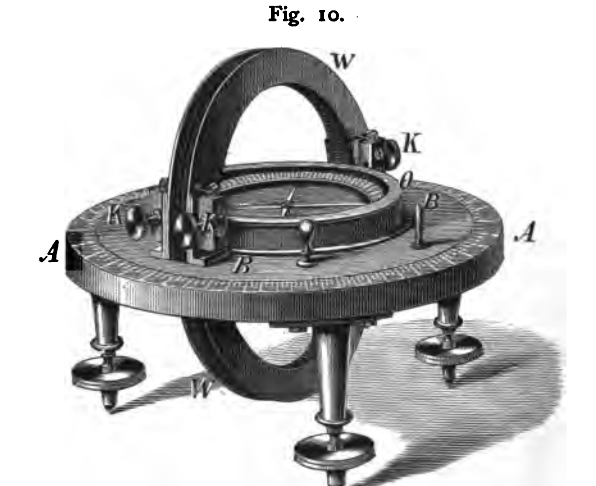
Die Sinus-Bussole gehört zur Classe derjenigen Mess-Instrumente, in welchen die Magnetnadel durch eine Gegenkraft in die Ruhelage zurückgeführt, und die Gegenkraft gemessen wird, welche zu der Zurückführung nothwendig ist. — Da bei dieser Methode die Nadel stets in derselben Lage zu dem ablenkenden Strome liegt, ist der Einfluss der Lage beseitigt und die Ablenkung nur noch von der Stromstärke abhängig. Bei der Sinus-Bussole wird diese Methode dadurch zur Anwendung gebracht, dass man die Umwindungen drehbar macht.

Wird die Nadel durch einen Strom abgelenkt, so dreht man die Windungen nach der Richtung der Ablenkung. Die Nadel wird dann weiter abgelenkt werden, aber schliesslich mit der Lage, welche sie zu den Windungen bei Ruhe einnimmt, wieder zusammenfallen, wenn die wachsende Wirkung des Erdmagnetismus der ablenkenden Kraft der Umwindungen gleich geworden ist. Ein solches Instrument ist die Sinus-Tangenten-Bussole (Fig. 10) von

Siemens & Halske, welche sowohl als Sinus- wie als Tangenten-Bussole gebraucht werden kann.

Der auf drei Stellschrauben gestellte Ring *A A*, der aus Metall angefertigt ist, trägt oben eine Kreistheilung. In diesem Ringe liegt drehbar ein anderer Ring *B B*, welcher die Bussole *O* trägt. — Weiter-

Fig. 10.



hin sitzt auf dem Ringe *B B* der Windungsring *W*, welcher hier in der Mitte der Bussole liegt. Derselbe trägt zwei Wickelungen, die eine von wenigen Windungen und dickem Draht, die andere von vielen Windungen aus dünnem Draht. Die Enden dieser Drähte führen zu den beiden Klemmschraubenpaaren *K K* und *k k*. Dem Instrumente sind zwei Magnetnadeln beigegeben, eine kurze Nadel mit Aluminiumspitzen und eine lange Nadel. Um das Instrument als Tangenten-Bussole zu gebrauchen, setzt

man die kurze Nadel in die Bussole ein und leitet den Strom durch die wenigen Windungen von starkem Draht. Der Windungskreis war vorher selbstverständlich in den magnetischen Meridian gestellt. Für die Benutzung des Instrumentes als Sinus-Bussole setzt man die lange Magnetnadel ein. Der zu messende Strom wird nun durch den dünnen Draht geleitet und lenkt alsdann die Magnetnadel ab. — Man dreht den Ring, auf welchem Bussole und Windungsring stehen, in demselben Sinne, in welchem die Ablenkung erfolgte; die Magnetnadel wird dadurch noch weiter abgelenkt. Ist aber der zu messende Strom nicht zu stark, so wird man es dahin bringen, dass die Nadel wieder mit dem Theilstrich der Bussole zusammenfällt, auf dem sie bei der Ruhelage lag. Sie liegt dann zu dem Stromkreise genau so, wie in der Ruhelage. Ihre Ablenkung vom Meridian hängt also, nach den vorausgeschickten Erläuterungen, nur noch von der Intensität, der sie proportional ist, und dem Erdmagnetismus ab, dessen Einwirkung dem Sinus der Ablenkung proportional ist. Es ist also die Stromstärke proportional $T \sin v$, wenn v den Ablenkungswinkel bedeutet; zwei Stromstärken verhalten sich somit, wie die Sinus der zugehörigen Ablenkungen in der Sinus-Bussole.

Den Ablenkungswinkel liest man an dem äusseren Theilkreise ab. An dem inneren Ringe ist nämlich ein Markirstrich, wenn nöthig, mit Nonius angebracht. Derselbe steht, wenn der Windungsring im magnetischen Meridiane liegt, auf einem Theilstrich der äusseren Theilung ein. Dreht man später den inneren Ring BB, bis die Compensation der Ablenkung durch die wachsende Kraft des Erdmagnetismus erfolgt, so wird der Markir-

strich die Ablenkung anzeigen, für welche die beiden Gegenwirkungen einander gleich werden.

Es ist übrigens aus dem Gesagten leicht ersichtlich, dass die Umwindung, durch welche die Magnetnadel abgelenkt wird, bei der Sinus-Bussole nicht nothwendig die kreisförmige Form haben muss. Denn da die Beobachtung der Stromstärke bei diesem Instrumente stets bei gleicher Lage der Nadel zu den Umwindungen erfolgt, also die Wirkung der Windungen auf die Nadel von der Form und Lage der Windungen unabhängig ist und sich nur mit der Stromstärke ändert, so kann der Draht auch in anderer Art als in Kreisen oder richtiger in Kreisspiralen gewickelt werden, wodurch dem Instrumente eine compendiösere Form gegeben werden kann.

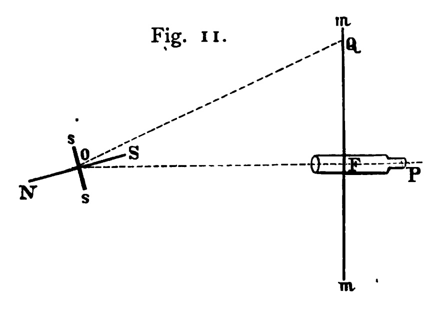
6. Das Spiegel-Galvanometer.

Wir gelangen nunmehr zu einem Instrumente für die Messung der Intensität des Stromes, welches an Empfindlichkeit und Schärfe der Messung alle bisher beschriebenen weit hinter sich zurücklässt, und welches als das eigentliche Präcisions-Instrument der Galvanometrie zu bezeichnen ist. Die Messungen, welche man mit ihm ausführen kann, stehen an Genauigkeit nicht hinter den vielbewunderten Messungen der Astronomen zurück, ja überflügeln dieselben fast. Dieses Instrument, dessen Entstehung wir dem Genie des grossen Gauss und seines Mitarbeiters Weber verdanken, ist das Spiegel-Galvanometer. — Es ist eines der genialsten Mess-Instrumente, die menschlicher Witz erdacht hat, und um so genialer, als es einfach ist.

Zuförderst soll aber, ehe die Beschreibung des Instrumentes und seines Gebrauches gegeben wird, ein Verfahren, kleine Winkel zu messen, beschrieben werden, das bei dem Spiegel-Galvanometer in Anwendung kommt und diesem Instrumente seine hohe Bedeutung verschafft hat. Dieses Verfahren ist nichts als eine einfache Anwendung der Spiegelgesetze. Die Idee, welche ihm zu Grunde liegt, ist die folgende:

In der Drehungsaxe eines drehbaren Körpers ist an demselben ein kleines Spiegelchen befestigt, dessen Fläche

Fig. 11.



senkrecht zu der Drehungsebene steht. Fig. 11 stellt den Horizontalschnitt dieser Vorrichtung dar. *N S* ist der drehbare Körper, *s s* das Spiegelchen. Die Drehungsebene von *N S* liegt in der Ebene der Zeichnung. In einiger Entfernung ist das Fernrohr *F* aufgestellt, dessen Axe die Mitte des Spiegelchens trifft. Unmittelbar über oder unter dem Fernrohr ist ein Massstab angebracht, für gewöhnlich ein Meter, welcher in Centi- und Millimeter getheilt ist. Denken wir uns nun, dass ein Lichtstrahl längs der Fernrohr-Axe hingeht. Derselbe wird auf das Spiegelchen in dessen Mitte auftreffen und durch Reflexion an dem Spiegelchen auf den Massstab reflectirt werden. Je nach der Ablenkung

des Spiegelchens wird er einen bestimmten Theilstrich des Massstabes beleuchten, und aus der Stelle, an welcher sich der Strahl durch einen leuchtenden Fleck markirt, können wir umgekehrt auf die Ablenkung des Spiegelchens schliessen und diese bestimmen. Denken wir uns nun, dass wir an Stelle der Lichtquelle, welche den Strahl durch das Fernrohr sandte, unser Auge bringen und den Massstab hell erleuchten, so wird, wenn wir uns vorstellen, dass der Lichtstrahl jetzt den umgekehrten Weg macht und vom Massstab in unser Auge geht, das Bild desjenigen Theilstriches, der vorher von dem Strahl getroffen wurde, in unser Auge fallen. Zur genauen Ablesung derselben ist im Fernrohr noch ein Fadenkreuz angebracht.

Man ersieht leicht, dass schon eine sehr geringe Aenderung der Lage des Körpers NS von einer merklichen Verschiebung der Theilstriche, welche man in dem Fernrohre erblickt, begleitet sein muss. Diese Verschiebung wird um so grösser sein, je weiter der Spiegel von dem Massstabe entfernt ist. Die Berechnung des Winkels aus der beobachteten Ablenkung ist eine einfache, wie eine kurze Betrachtung der Verhältnisse zeigt. Fällt in der Ruhelage die Normale der Spiegelebene mit der Fernrohr-Axe zusammen, so ist nach erfolgter Ablenkung der Winkel, welchen nunmehr die Normale mit der Fernrohr-Axe bildet und den wir α nennen wollen, gleich dem Winkel, um welchen der Körper NS gedreht ist. Sendet nun der Theilstrich Q denjenigen Strahl aus, der in das Auge gelangt, so wird nach den Spiegelgesetzen der Winkel, den dieser Strahl QO mit der Spiegelnormalen bildet, gleich sein dem Winkel, den der reflectirte Strahl OP

mit derselben bildet. Dieser letztere ist aber nach dem Obigen gleich a, somit der Winkel $POQ = 2a$. Nun ist aber, wie sofort zu sehen,

$$\operatorname{tg} 2a = \frac{PQ}{PO}$$

oder gleich der Entfernung des beobachteten Theilstriches von dem Theilstrich der Ruhelage, dividirt durch die Entfernung des Massstabes von dem Spiegel. Ist also die Entfernung PO ein Mehrfaches, sagen wir n-faches von ganzen Metern und der Massstab in Metertheilung getheilt, so haben wir nur den Metertheil PQ, den wir unmittelbar aus der Beobachtung ablesen, durch n zu dividiren, um sofort die Tangente des doppelten Ablenkungswinkels zu erhalten. Wir werden aber weiterhin sehen, dass es nicht einmal dieser Operationen bei dem Gebrauch des Instrumentes bedarf, sondern dass die einfache Beobachtung der Ablenkung genügt, um das Verhältniss der Stromstärken unmittelbar anzugeben.

Zuerst angewendet hat diese sogenannte »Spiegel-Ablesung« unser grosser Gauss und zwar bei seinen epochemachenden Messungen der erdmagnetischen Kraft nach absolutem Masse, welche bahnbrechend für die Galvanometrie werden sollten. Gauss berechnete diese Kraft, indem er einen Magnet wagrecht an einem Coconfaden oder feinen Draht aufhing und dessen Schwingungen mittelst der Spiegel-Ablesung beobachtete. Hieraus und aus der Form und der Masse des Magneten konnte er einen Schluss auf die Wirkung der Erdkraft auf den Magnet ziehen und diese Wirkung in absolutem Masse ausdrücken. Diese Vorrichtung, Magnetometer genannt, benutzte Weber zu einer Messung der Stromstärke,

indem er um den schwebenden Magnet eine Anzahl Drahtwindungen führte und durch diese einen Strom leitete, dessen Intensität gemessen werden sollte. Da bei der ausserordentlichen Feinheit der Spiegel-Ablesung der Ausschlag, welchen der Magnet unter Einwirkung des Stromes zeigte, nur sehr gering zu sein brauchte, um genau gemessen werden zu können, konnte man den Einfluss der verschiedenen Entfernungen der Theile des Magnetes von den Stromkreisen vernachlässigen und für den Zusammenhang zwischen Stromstärke und Ablenkung unbedenklich das Tangenten-Gesetz anwenden. Da es sich ferner bei dergleichen Messungen um Ermittelung des Verhältnisses zweier Stromstärken handelt, so konnte man, ohne eine ins Gewicht fallende Ungenauigkeit zu begehen, das Verhältniss der Stromstärken dem Verhältniss der an dem Massstabe beobachteten Ausschläge gleichsetzen. Diese Ausschläge verhalten sich, wie eben gesagt, wie die Tangenten der doppelten Ablenkungswinkel. Für kleine Winkel kann man aber setzen

$$\operatorname{tg} 2v = 2 \operatorname{tg} v$$

waren nun die Ablenkungen a_1 und a_2 für zwei zu vergleichende Stromstärken gefunden, so ist

$$\frac{\frac{a_1}{PO}}{\frac{a_2}{PO}} = \frac{a_1}{a_2} = \frac{\operatorname{tg} 2v_1}{\operatorname{tg} 2v_2} = \frac{2 \operatorname{tg} v_1}{2 \operatorname{tg} v_2} = \frac{i_1}{i_2}$$

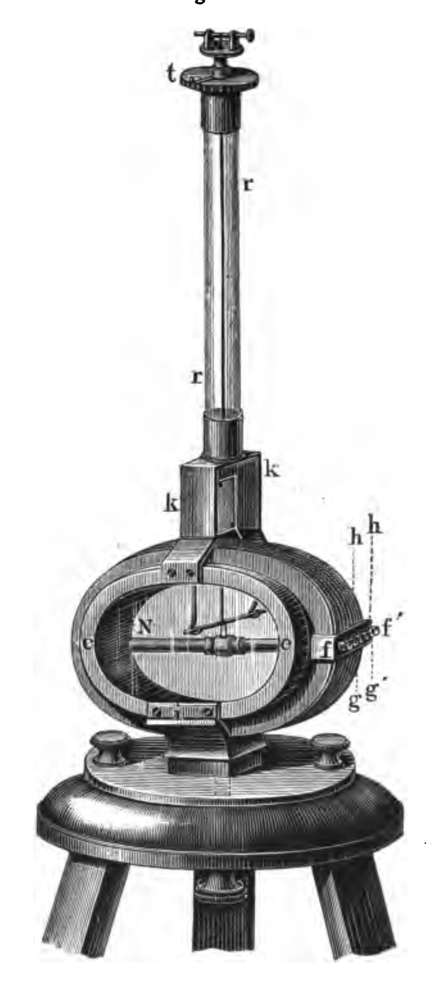
wenn i_1 und i_2 die beiden Stromstärken bedeuten.

Wir sehen also, dass unter gedachten Umständen das Verhältniss der beiden beobachteten Verschiebungen der Theilstriche im Fernrohr dem Verhältnisse der Intensitäten gleich gesetzt werden kann.

Das ursprünglich von Weber construirte und von ihm zu vielfachen Messungen verwendete Spiegel-Galvanometer war ein transportables Magnetometer, das mit Drahtwindungen versehen war. Dasselbe ist in Fig. 12 dargestellt. Auf einem Kugelsegment von Messing, dessen convexe Seite in einer kugelförmig ausgearbeiteten Vertiefung der Bodenplatte liegt, ist durch seitliche Fortsätze *i* ein elliptischer Kupferring *ee* von 80 Mm. Breite und 8 Mm. Wandstärke befestigt; in der grossen Axe dieses Ringes schwebt die Magnetnadel. Auf diesen Ring ist ein Rahmen von dünnem Messingblech geschoben, auf welchem in neun Lagen übereinander, in jeder Lage 80 Windungen nebeneinander, übersponnener Kupferdraht von 0·66 Mm. Dicke gewunden ist. Je drei Lagen sind aus einem Stück, so dass eigentlich drei Drähte, jeder in drei Lagen, die Umhüllung des Rahmens ausmachen. Die Enden der Drähte sind an Klemmschraubenpaare geführt, die von einander isolirt sind. Man kann also die Drähte nach Belieben hinter- und nebeneinander, oder auch theilweise ausschalten. Auf dem Kupferring ist durch seitliche Schrauben der Rahmen *k k* befestigt, welcher die Röhre *r* mit dem Torsionskreis *t* trägt. Durch eine Durchbohrung des Rahmens *k* hängt von der Mitte des Torsionskreises ein Coconfaden herab, welcher den Spiegel mit der Magnetnadel trägt. Der Rahmen *k* ist nach vorn und hinten durch Spiegelscheiben geschlossen, und in dem so gebildeten Gehäuse bewegt sich der Spiegel.

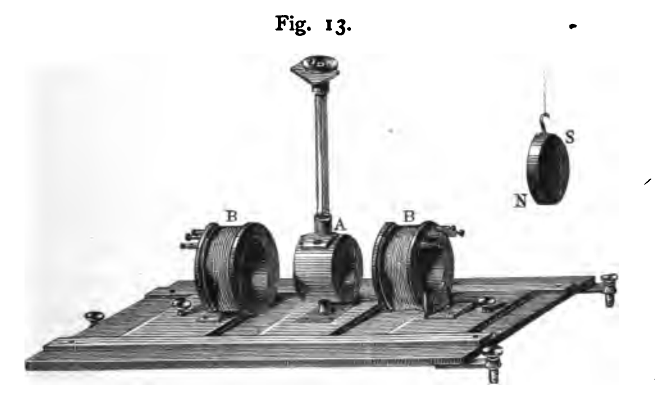
Eine andere Construction hat Wiedemann angegeben, welche sich durch die Eigenthümlichkeit auszeichnet, dass ein magnetisches Stahlspiegelchen zugleich

Fig. 12.



den Spiegel und die Magnetnadel bildet. Auf einer dicken Hülse von Kupfer *A* (Fig. 13) von 17 Mm. Wanddicke und 21 Mm. Länge steht eine Glasröhre, in welcher von dem oberen Ende ein Coconfaden herabhängt. An diesem Faden hängt ein Stahlspiegelchen von 1 Mm. Dicke und 19 Mm. Durchmesser, welches sich in der Höhlung der Kupferhülse bewegt. Das Stahlspiegelchen ist so magnetisirt, dass seine magnetische Axe in den horizon-

Fig. 13.



talen Durchmesser des Kreises fällt. Die Kupferhülse steht auf der Mitte eines Schlittens, der durch drei Stellschrauben horizontal gestellt werden kann. Auf diesem Schlitten lassen sich zwei Drahtspiralen hin- und herschieben, deren innerer Durchmesser so gross ist, dass die Spiralen gerade auf die Kupferhülse passen. Jede Spirale besteht aus zwei 60 Mtr. langen und 1 Mm. dicken übersponnenen Kupferdrähten, deren Enden an besondere Klemmschrauben geführt sind. Der Apparat wird so gestellt, dass die Axe der Hülse und der Spiralen senkrecht zum magnetischen Meridian ist. Je nach der

Stärke der zu messenden Ströme können die Spiralen der Hülse angenähert oder von ihr abgerückt werden.

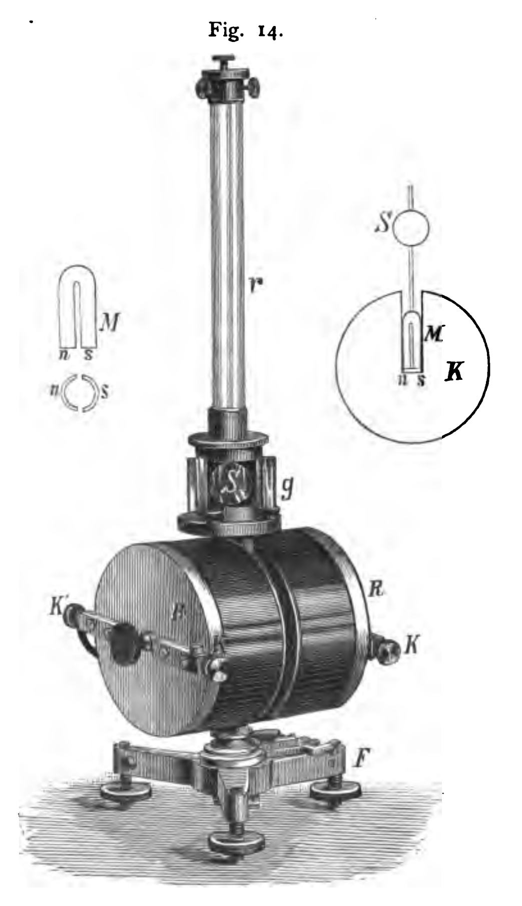
Die bei den beiden eben beschriebenen Apparaten angewendeten Kupferhülsen, in denen sich der Magnet bewegt, haben einen besonderen Zweck, nämlich die Schwingungen des Magnetes zu verringern. Diese Eigenschaft, welche man die Dämpfung des Magnetes heisst, beruht auf der Magnet-Induction. — Bewegt sich ein Magnet in der Nähe eines Leiters, so erzeugt er bekanntlich Ströme in demselben, wenn der Leiter geschlossen ist. Diese Ströme werden nun auf den Magnet zurückwirken und ihm eine solche Bewegung zu geben suchen, welche der eigenen Bewegung des Magnetes gerade entgegengesetzt ist. Um das einzusehen, wollen wir uns daran erinnern, dass man einen Magnet durch ein System paralleler Kreisströme ersetzt denken kann. Nähert sich nun ein Magnet einem geschlossenen Leiter, so erzeugt er in demselben einen Strom, welcher der Richtung der Kreisströme des Magnetes entgegengesetzt läuft. Ströme von entgegengesetzter Richtung stossen sich aber ab, somit erhält der Magnet bei Näherung an den Leiter einen Bewegungsantrieb, der ihn vom Leiter entfernt, und bei der Entfernung vom Leiter einen solchen, der ihn dem Leiter zu nähern sucht, wie man das nach dem Gesagten leicht selbst herausfinden kann. Diese dämpfende Kraft wird um so stärker wirken, je weniger Widerstand der Leiter darbietet, und aus diesem Grunde wählt man die dicken Kupfergehäuse für den Magnet. Der Grad der Dämpfung ist ein verschiedener. Bei dem Weber'schen Galvanometer nimmt der Magnet nicht sofort die Ruhelage an, obwohl die

Abnahme der Ausschläge eine sehr bedeutende ist. Bei Wiedemann's Galvanometer geht jedoch das Stahlspiegelchen fast sofort in die Ruhelage zurück. Dergleichen Galvanometer, in denen durch die Dämpfung die periodischen Schwingungen des Magnetes aufgehoben sind, heissen aperiodische oder schwingungsfreie Galvanometer.

Ein solches aperiodisches Galvanometer ist das nachstehend beschriebene von Siemens & Halske, das wegen seiner compendiösen Construction und des bei ihm angewendeten Glockenmagnetes sich als ein Fortschritt gegen die vorigen Galvanometer erweist. Dieser Glockenmagnet ist nichts anderes als ein kleiner, hohler Stahlcylinder, welcher an einem Ende offen, und an dem anderen durch eine Kugelcalotte geschlossen ist. Zu beiden Seiten ist er von dem offenen Ende bis an die gewölbte Decke aufgeschlitzt und bildet so zwei Schenkel, welche magnetisirt werden. Durch diese Formgebung erreicht man, dass das Trägheitsmoment ein Minimum wird, ohne das magnetische Moment zu vermindern, und erzielt damit eine grössere Wirkung der dämpfenden Kraft. Dieses Glockenmagnetchen, das etwa 10—15 Mm. lang ist und einen Durchmesser von 3—5 Mm. hat, dreht sich in der Ausbohrung einer massiven Kupferkugel, welche mit einem Zapfen in dem durch Stellschrauben verstellbaren Dreifuss F (Fig. 14) sitzt. Auf der Kugel ist das Gehäuse des Spiegels befestigt, welches die Röhre r trägt; in derselben hängt der Coconfaden, welcher Spiegel und Magnet trägt. Um das schwingende System möglichst leicht zu machen, sind Spiegel und Magnet durch ein feines Stäbchen aus Aluminium verbunden.

Horizontal und einander diametral gegenüber sind an der Kupferkugel zwei runde Arme befestigt, auf welche

Fig. 14.



die beiden Spiralen *R* geschoben werden. Die Anzahl der Windungen und der Widerstand jeder Spirale sind je

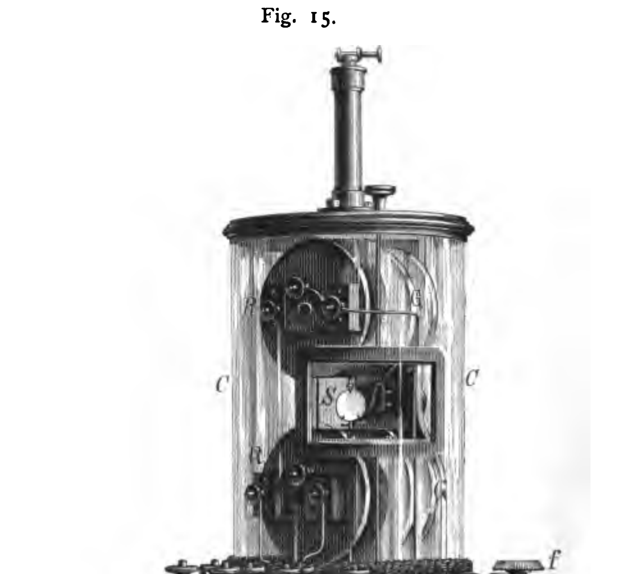
nach den Zwecken, für welche das Galvanometer bebestimmt ist, verschieden und variiren von einigen hundert Windungen und wenigen Einheiten bis zu mehreren tausend Windungen und Widerstands-Einheiten. Der Spiegel ist ein rundes Glasplättchen von 8—10 Mm. Durchmesser, welches auf beiden Seiten parallel geschliffen und polirt und dann auf einer Seite versilbert ist. Diese Spiegelchen zeichnen sich sowohl durch Leichtigkeit und Haltbarkeit, als auch durch die Schärfe ihrer Bilder aus. Das Instrument kann leicht in ein Differential-Galvanometer verwandelt werden, indem man die beiden von einander unabhängigen Drahtrollen auf den Armen verschiebbar macht.

Den höchsten Grad von Empfindlichkeit und Genauigkeit erreicht das astatische Spiegel-Galvanometer. Ein solches von Siemens & Halske ist in Fig. 15 dargestellt.

Auf der Grundplatte *P* ist das Gestell *G* aus Messing befestigt, welches die vier Drahtrollen *R* und die Aufhängungsröhre *A* trägt. Zwischen den beiden oberen wie zwischen den beiden unteren Rollen schwingt je ein Glockenmagnet, die beide durch eine leichte Stange so miteinander verbunden sind, dass sie ein astatisches Nadelpaar bilden. Der Spiegel sitzt an der Stange in der Mitte zwischen beiden Magneten, wodurch der Einfluss von Erschütterungen möglichst vermindert wird. Jede Drahtrolle, welche etwa 6000 Windungen trägt, ist unabhängig von der anderen, indem ihre Drahtenden an gesonderte Klemmschrauben geführt sind, so dass deren acht, 4 Eingangs- und 4 Ausgangs-Klemmen, auf der Grundplatte stehen. Diese Klemmen können

nach Belieben so miteinander verbunden werden, dass die Rollen hinter- oder nebeneinander geschaltet sind.

Fig. 15.



Der Spiegel ist an der Stange nach allen Seiten drehbar, und auch die Aufhängung kann beliebig gedreht werden. Ein rundes Glasgehäuse, das in der Mitte einen

rechteckigen, durch eine Spiegelscheibe geschlossenen Ausschnitt für die Spiegel-Beobachtung hat, schützt die Rollen und die Magnete; die Klemmschrauben stehen ausserhalb des Glasgehäuses. Unter der Grundplatte, die drei Stellschrauben zum Ausrichten des Instrumentes trägt, befindet sich ein Richtmagnet. Derartige Richtmagnete haben die Bestimmung, die Astasie der Nadeln, welche nie eine vollkommene ist, in beliebigem Grade zu erhöhen, indem ihre Wirkung auf die Nadeln eine der Wirkung des Erdmagnetismus entgegengesetzte ist, diese letztere also durch den Richtmagnet neutralisirt wird. Bei unserem Galvanometer ist der Richtmagnet aus zwei scheerenartig gekreuzten Magneten gebildet, welche durch die Radübertragung *U* in beliebige Winkel zu einander gestellt werden können. Man erreicht dadurch, dass die Wirkung des Magnetes beliebig verstärkt oder abgeschwächt werden kann, je nachdem man die gleichen oder die ungleichen Pole einander nähert; der Richtmagnet wird also dann das Maximum seiner Wirkung ausüben, wenn die gleichen Pole zusammen fallen, dagegen nur eine verschwindende Wirkung haben, wenn die ungleichen Pole übereinander liegen. Zwischen diesem Maximum und Minimum kann durch Aenderung der Kreuzung jeder beliebige Stärkegrad der Wirkung erzielt werden. Dieses Richtmagnet-System lässt sich aber auch noch bei festgehaltener Kreuzung drehen, wodurch der astatischen Nadel und dem Spiegel eine beliebige Lage gegeben werden kann. Bei dem Gebrauche steht das Instrument auf cylindrischen Füssen von Horngummi, damit es möglichst isolirt ist und Nebenschlüsse vermieden werden. Diese Vorsichtsmassregeln sind noth-

wendig, da die Empfindlichkeit des Instrumentes eine ganz ausserordentliche ist. Ein Daniell-Element ruft noch eine deutliche Ablenkung hervor, wenn in den Stromkreis ein Widerstand von 100 Millionen Einheiten eingeschaltet ist.

Es bleibt noch übrig, die Dämpfung an dem Instrumente zu besprechen. Zu diesem Zwecke können in die Spiralen massive Kupfercylinder eingeschoben werden, welche an ihren inneren Enden eine Auskehlung tragen, so dass je zwei von ihnen einen Magnet vollkommen umschliessen, wenn sie vollständig eingeschoben sind. Durch Herausziehen dieser Dämpfer kann die Dämpfung beliebig abgeschwächt werden.

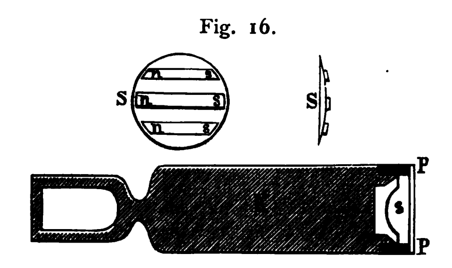
In einigen Einzelheiten abweichend ist das astatische Spiegel-Galvanometer von Thomson. An Stelle der Glockenmagnete hat es kleine Magnetmagazine, welche je aus fünf dünnen und kurzen Magnetstäbchen bestehen. Diese Stäbchen liegen parallel mit Zwischenräumen übereinander, das längste in der Mitte, die beiden kürzesten nach Aussen. Zur Dämpfung trägt die Verbindungsstange der Magnete Windflügel aus Glimmer. Die Empfindlichkeit dieses Instrumentes kommt der des vorhin beschriebenen gleich.

Durch einfache Construction zeichnet sich das transportable Spiegel-Galvanometer von Thomson aus. Eine einzige Drahtrolle, die auf einen Fuss gestellt ist, trägt die Windungen. In die Höhlung dieser Rolle kann ein Kupfercylinder eingeschoben werden, welcher an dem einen Ende eine kurze Ausbohrung trägt; in derselben liegt ein Hohlspiegelchen, wie aus Fig. 16 zu erkennen ist. — Dasselbe ist an zwei ganz kurzen

Fäden befestigt und hat in der Ausbohrung nur geringen Spielraum. Auf der Rückseite des Spiegelchens sind drei feine Magnetstäbchen parallel aufgeklebt, welche die Magnetnadel des Instrumentes bilden. Senkrecht auf der Rolle steht ein kurzer Messingstab, an dem sich ein Richtmagnet drehen und verschieben lässt. Die Schwingungen des Magnetes sind bei diesem Instrumente sehr kurz.

Nicht übermässig empfindlich, ist dieses Instrument doch wegen seiner einfachen und compendiösen Con-

Fig. 16.



struction und der leichten Handhabung für viele Zwecke sehr geeignet.

Es erübrigt noch einige Nebensachen zu besprechen, zunächst die Scalen, welche zur Ablesung dienen. Dieselben sind meistens in Metermass bis auf Millimeter getheilt. Die besten, aber auch theuersten, sind die von Glas, bei welchen die Theilstriche und die — wegen der Umkehrung im Spiegel in verkehrter Schrift gegebenen — Zahlen durchsichtig, der übrige Theil matt geschliffen ist. Dieselben werden von hinten beleuchtet.

An Stelle dieser theueren und zerbrechlichen Scalen benutzt man vielfach solche aus Papier, auf

welches der Massstab lithographisch aufgedruckt ist. Dieselben sind entweder aus gewöhnlichem weissen Papier gefertigt und auf eine Leiste gezogen, in welchem Falle sie von vorn beleuchtet werden müssen, oder aus Pergamentpapier hergestellt und in einen mit Glas bedeckten Rahmen gespannt; diese letzteren werden, wie die Glasscalen, von hinten beleuchtet.

Die benutzten Fernrohre sind gewöhnliche astronomische Fernrohre mit 8—12maliger Vergrösserung

Statt der Ablesung mittelst des Fernrohres wendet man zuweilen eine andere, die sogenannte objective an. — Eine Laterne, in welcher eine Petroleumflamme brennt, trägt eine horizontale Röhre, in welche die Fassung einer Linse gesteckt werden kann. In dem Rohre ist vertical in der Mitte ein feiner Draht ausgespannt. Die von der Lampe kommenden Strahlen fallen durch die Linse auf das Spiegelchen des Galvanometers und werden von diesem auf die Scala geworfen. Die Linse ist so eingestellt, dass das Bild des Drahtes auf die Scala projicirt wird. Bei der Bewegung des Spiegelchens bewegt sich auch das Bild des Drahtes auf der Scala und gestattet so ein Ablesen des Ausschlages; diese Ablesung ist allerdings nicht so genau, wie mittelst des Fernrohres, ist aber weit bequemer und weniger anstrengend.

Die objective Methode ist auch besonders für Vorlesungen geeignet, wo es sich darum handelt, den Ausschlag einem grösseren Publikum bemerkbar zu machen. In diesem Falle bedarf es aber einer stärkeren Lichtquelle und einer grösseren Scala mit gröberer Theilung. Ganz besonders eignen sich hier als Lichtquelle die

Glühlampen, da sie nur geringen Raum in Anspruch nehmen, keinen Rauch und wenig Hitze entwickeln, und ohne weitere Umstände ein genügend starkes Licht geben.

7. Das Torsions-Galvanometer.

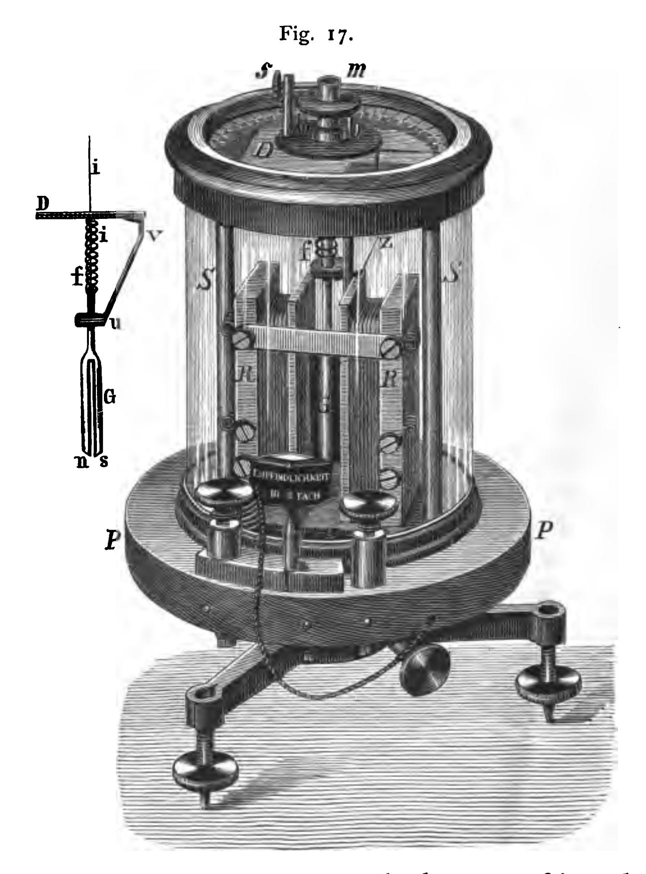
Als letzter der hierher gehörigen Mess-Apparate soll ein sinnreiches und bequemes Instrument, das Torsions-Galvanometer, beschrieben werden, das insbesondere zu Messungen von Spannungen dient. Bei diesem Instrumente wird, wie bei der Sinus-Bussole, der Magnet durch eine Gegenkraft in der festen Lage zu den Windungen gehalten. Während aber bei der Sinus-Bussole der Erdmagnetismus als Richtkraft dient, welche mit dem Sinus des Ablenkungswinkels wächst, wird im Torsions-Galvanometer die Torsion benutzt, deren Kraft proportional mit dem Torsionswinkel zunimmt. Es wird also die drehende Kraft, welche die Windungen auf den Magnet ausüben, proportional dem Winkel sein, um welchen der Torsionsdraht oder die Torsionsfeder der Richtung der Ablenkung entgegengedreht werden muss, um den Magnet wieder in seine ursprüngliche Lage zurückzubringen.

Das nachstehend beschriebene Torsions-Galvanometer ist ein solches von Siemens & Halske.

Auf einer runden Grundplatte (vergl. Fig. 17), die sich auf einem einstellbaren Dreifuss drehen kann, stehen die Rahmen *R R*, welche die Windungen tragen. Die viereckigen Rahmen sind so aufgestellt, dass die längeren Seiten vertical stehen. Auf der Grundplatte stehen ferner zwei Messingsäulen, welche die gläserne Deckplatte

tragen; dieselbe hat eine eingeritzte Kreistheilung. Die Säulen sind durch einen Querbalken *q* verbunden, auf dem

Fig. 17.



in der Mitte ein kurzes Messingröhrchen *m* aufsitzt, das durch eine Durchbohrung der Deckplatte geführt ist. Durch dieses Röhrchen geht der Coconfaden, an welchem

der Magnet hängt; der Faden ist um den drehbaren Stift *s* gewickelt, mittelst dem derselbe angezogen oder nachgelassen werden kann. Um das Röhrchen *m* dreht sich eine messingene Büchse *b*, welche durch die Deckplatte führt und unter derselben einen horizontalen Zeiger trägt, der sich an der Kreistheilung der Platte hinbewegt. An dieser Büchse, die durch einen Kopf von aussen gedreht werden kann, hängt eine feine Feder, deren anderes Ende an dem Magnete befestigt ist. Der Coconfaden, an welchem der Magnet hängt, führt durch das Röhrchen *m* und den Canal der Torsionsfeder hindurch und ist so lang, dass der Glockenmagnet *G* gerade zwischen den beiden Rahmen *R* hängt. An dem kurzen Stiel des Magnetes ist ein leichter Zeiger *z* befestigt. Derselbe ist zweimal umgebogen, bei *u*, wo er schräg aufwärts steigt, und dann bei *v*, wo er sich in ein kurzes verticales Stück fortsetzt. Dieses verticale Stück, das dicht unter der Deckplatte schwebt, trägt eine umgebogene und geschwärzte Spitze, die nach innen weist. Der Zeiger führt durch eine Ausbohrung des Querbalkens *q* und kann nur innerhalb dieser Ausbohrung spielen. Das Instrument wird nun so eingestellt, dass die Markirspitze des Zeigers *z* genau mit dem Nullstrich der Theilung der Deckplatte zusammenfällt. Geht dann ein Strom durch die Umwindungen, so wird der Magnet und sein Zeiger abgelenkt werden.

Dreht man den Kopf der Büchse *b* im entgegengesetzten Sinne, so wird dadurch die Feder *f* tordirt, und der Magnet erhält hierdurch einen Drehungsantrieb, welcher der Wirkung der Windungen entgegengesetzt ist. Man tordirt die Feder so weit, bis man die Markir-

spitze wieder auf den Nullstrich gebracht hat. Der an der Büchse *b* befestigte Zeiger zeigt dann an der Kreistheilung den Winkel an, um welchen die Feder tordirt worden ist. Die Torsionskraft der Feder ist so justirt, dass die Spannung von 1 Volt an den Klemmschrauben des Galvanometers einer Torsion von 100^0 oder 1000^0 entspricht; es bedeutet also dann jeder Grad der Torsion ein Hundertstel oder Tausendstel Volt. Damit auch grössere Spannungen mit dem Instrumente gemessen werden können, liegt in der Grundplatte ein Zusatzwiderstand, der das Neunfache des Widerstandes der Drahtrollen ist; derselbe kann durch den Stöpsel *t* ausgeschaltet werden. Ist er eingeschaltet, so hat jeder Torsionsgrad den zehnfachen Werth, also $^1/_{10}$ oder $^1/_{100}$ Volt.

Das verhältnissmässig grosse Trägheitsmoment des Magnetes verhindert ein rasches Einstellen desselben in seine Ruhelage. Um diesem Uebelstande zu begegnen, lässt man den Magnet mit einer feinen Spitze in einer Pfanne aufstehen, wobei die Reibung der Spitze in der Pfanne zur schnelleren Beruhigung des Magnetes hilft. Neuerdings erzielt man die Hemmung durch Glimmerflügel, die zwischen festen Platten schwingen. Hierbei werden die Luftmassen, welche zwischen den Platten liegen, durch die Schwingungen der Flügel zu einem gewissen Grade comprimirt, resp. verdünnt, da der Dichtigkeitsausgleich sich zwischen den festen Platten langsamer vollzieht, als wenn die Flügel in freier Luft schwingen. Demgemäss werden hierdurch die Bewegungen der Flügel und des Magnetes rasch gehemmt.

8. Die Elektro-Dynamometer.

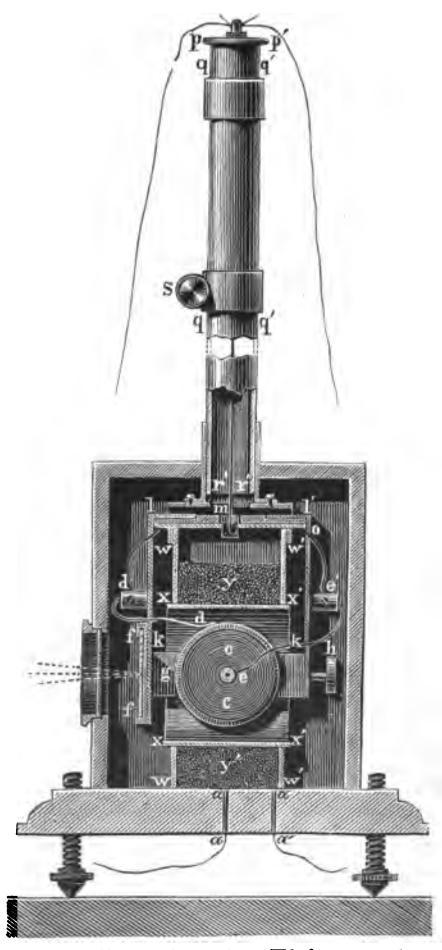
Diese Instrumente haben die Eigenthümlichkeit, dass die Richtung ihres Ausschlages nicht von der Stromrichtung abhängt, so dass man mit ihnen ebensowohl gleichgerichtete als Wechselströme nachweisen kann. Wir verdanken dieses Instrument W. Weber, der es bei seinen genialen Massbestimmungen benutzte. Die Construction seines Instrumentes war folgende: An einer bifilaren Aufhängung hing in einer Gabel eine Drahtrolle; die beiden Aufhängefaden waren feine Drähte, die zu gleicher Zeit als Zuleitungen zu der schwingenden Rolle dienten.

Diese Rolle schwebte in einer anderen festen Rolle, deren Windungsrichtung senkrecht zu der der ersteren war. Die Verbindung des Zweifadensystems mit der schwingenden Rolle durch eine Gabel war deshalb gewählt, um die Suspension nicht durch die feste Rolle hindurchführen zu müssen. Fig. 18 giebt eine Ansicht des Instrumentes.

Geht nun ein Strom durch die feste Rolle, und von dieser aus durch die schwingende, so wird von der festen auf die schwingende ein Drehungsmoment ausgeübt, indem das Bestreben eintritt, die Kreisströme einander parallel zu stellen. — Wechselt der Strom, so wechselt er in beiden Spiralen und dadurch wird an der Wirkung der beiden Rollen nichts geändert, sie ist von der Richtung des Stromes unabhängig.

Eine Verbesserung dieses Weber'schen Elektro-Dynamometers ist das Elektro-Dynamometer für schwache Ströme von Siemens & Halske. Die hier folgende

Fig. 18.



Darstellung desselben ist der Elektro-technischen Zeitschrift 1880, S. 14, entnommen.

»Diese neue Construction des Weber'schen Elektro-Dynamometers ist im Wesentlichen eine Ausführung des von Dr. O. Frölich in Poggendorff's Annalen, Bd. 143, S. 643 ff., angegebenen Principes. Bei dem Weber'schen Elektro-Dynamometer muss bekanntlich die Axe der inneren Rolle senkrecht zu derjenigen der äusseren gestellt werden; giebt man nun den Rollen die gewöhnliche cylindrische Form, so muss die innere Rolle so klein gemacht werden, dass sie sich in dem Hohlraume der äusseren vollständig umdrehen kann, und der Abstand der inneren Windungen von den äusseren wird auf diese Weise verhältnissmässig gross. Um daher den Abstand möglichst klein und die inneren Windungen möglichst an die äusseren anschliessend zu machen, ist dem Hohlraum der äusseren und der ganzen inneren Rolle die Form einer Kugel gegeben.

Um möglichst grosse Empfindlichkeit zu erlangen, ist die Aufhängung nicht, wie sonst bei diesen Instrumenten, bifilar construirt, sondern die innere Rolle hängt an einem einzigen Drahte, durch welchen der Strom eintritt, während der Austritt des Stromes durch eine von dieser Rolle nach unten geführte Spiralfeder stattfindet. Der bei der Aufhängung und der Spiralfeder verwendete Draht ist Platindraht von 0·04 Mm. Durchmesser. Das obere Ende des Drahtes, an welchem die Rolle hängt, ist an einen kleinen Torsionskreis geführt, durch welchen dem Drahte beliebige Torsion ertheilt werden kann. Die Dämpfung der Schwingungen geschieht mechanisch, indem unten an der beweglichen Rolle zwei Flügel befestigt sind, welche in einen, mit Wasser gefüllten, im Grundbrette angebrachten Hohlraum tauchen.

Der bei dieser Art von Dämpfung häufig auftretende Fehler der mangelhaften Einstellung des Nullpunktes ist dadurch vermieden, dass die die Wasseroberfläche durchschneidenden Theile der Flügel messerartig zugeschärft sind. Die Höhe der Wasseroberfläche wird durch eine Art von Mariotte'schem Gefässe constant erhalten. In die Axe der kleineren Rolle kann ein kleiner Eisenkern eingeschoben werden; durch denselben wird die Empfindlichkeit des Instrumentes auf ungefähr das Doppelte gebracht, die Ausschläge sind alsdann jedoch nicht mehr ganz proportional dem Quadrate der Stromstärke.

Die eine der beiden äusseren Rollen kann leicht abgenommen werden, zum Zweck der Einstellung der inneren Rolle oder des Einsetzens oder Herausnehmens des Eisenkerns.

Gewöhnlich wird der inneren Rolle sowohl wie jeder der beiden äusseren Rollen ein Widerstand von etwa 100 S.-E. gegeben; die Widerstandsverhältnisse lassen sich jedoch beliebig verändern.

Das Instrument ist mit Spiegel-Ablesung versehen; der Spiegel ist beliebig drehbar, das Instrument also in beliebiger Weise aufzustellen, und der Spiegel so gross, dass sich leicht damit eine objective Darstellung für ein grösseres Publikum verbinden lässt.

Bei der gewöhnlichen Wickelung, bei einer Entfernung der Scala von 2 Mtr., giebt ein Element in 20.000 S.-E. einen Ausschlag von 1 Mm. Ein Telephon mit Hufeisenmagnet von Siemens & Halske giebt mit der Ruftrompete einen Ausschlag von wenigstens 500 Mm., und bei kräftigem Singen erhält man noch sicher messbare Ausschläge.«

Das bei den Elektro-Dynamometern zur Anwendung kommende Princip, dass das Drehungsmoment, welches auf die schwingende Rolle ausgeübt, proportional dem Quadrate der Stromstärke, ist insofern von Bedeutung, als auch das Arbeits-Aequivalent des elektrischen Stromes proportional dem Quadrate seiner Stromstärke ist, mit anderen Worten, zwei Arbeitsquantitäten können Ströme erzeugen, deren Stromstärken sich wie Wurzeln der Arbeitsquantitäten, oder umgekehrt, zwei Ströme können Arbeiten erzeugen, deren Grössen sich verhalten wie die Quadrate der Stromstärken.

Die Elektro-Dynamometer geben. nun also für zwei Ströme sofort mit dem Verhältniss der Drehungsmomente auch das Verhältniss der in den Strömen geleisteten Arbeit an.

Wegen der Wichtigkeit der Grösse »aufgewendete, resp. geleistete Arbeit« des Stromes erweist sich die directe Bestimmung derselben mittelst des Dynamometers als eine sehr nützliche, und es sind daher auch vielfach Instrumente construirt worden, welche auf dem Principe des Elektro-Dynamometers beruhen. Selbstverständlich muss ein solcher Apparat, der in erster Reihe bei den Dynamo-Maschinen in Anwendung kommt, mit Rücksicht auf die hier auftretenden grossen Quantitäten Elektricität ein wenig robuster gebaut sein, als das vorhin beschriebene Instrument. Ein derartiges Instrument von Siemens & Halske ist in Fig. 19 dargestellt. Zur Messung des Drehungsmomentes ist das Torsionsprincip angewendet und in wesentlich gleicher Weise wie bei den Torsions-Galvanometern in Construction gesetzt. Auf der Grundplatte steht vertical das Brett *b*; dasselbe

trägt die Aufhängung der beweglichen Rolle und die Torsionsfeder, die mit Zeiger und Knopf versehen ist, wie bei dem Torsions-Galvanometer schon beschrieben

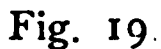


Fig. 19.



wurde. Der Theilkreis T ist hier von Papier und der Zeiger bewegt sich über demselben. Die bewegliche Rolle hängt an einem Seidenfaden; an derselben ist das eine Ende der Torsionsfeder F befestigt, während das andere mit dem Knopfe verbunden ist, durch dessen Drehung sie tordirt

wird. Die bewegliche Rolle *W* besteht nur aus einer einzigen Windung von 3—4 Mm. dickem Draht. Die Zuleitung zu derselben erfolgt durch Quecksilbernäpfe, welche in der Drehungsaxe übereinander liegen, der eine in, der andere unter der beweglichen Rolle. Die beiden Drahtenden der beweglichen Rolle tauchen in diese Näpfe und vermitteln so die Verbindung. Die feste Rolle *AA* ist an dem Brette *b* befestigt. Sie hat zwei Wickelungen von 5 resp. 50 Wind. Das eine Paar Enden der beiden Drähte führt gemeinsam an die Klemmschraube 3, während das andere Paar für jeden Draht gesonderte Klemmschrauben hat; während also der eine Pol immer an 3 liegt, können wir durch Anlegen des anderen Poles an 1 oder an 2 den Strom durch die eine Wickelung oder durch die andere gehen lassen. — Es erübrigt noch einer Hilfsvorrichtung der Intensitätsmesser Erwähnung zu thun, des sogenannten Nebenschlusses.

Wenn sich der Fall ereignet, dass der mit dem Galvanometer zu messende Strom zu gross für das Galvanometer ist, und die Ablenkung jenseits der äussersten Punkte der Scala fällt, so kann man dadurch Abhilfe schaffen, dass man nicht den ganzen Strom mit dem Galvanometer misst, sondern nur einen bekannten Bruchtheil desselben. Zu diesem Zwecke bildet man aus dem Galvanometer einerseits und einem Widerstande, der in einem bekannten Verhältnisse zu dem des Galvanometers steht, eine Stromverzweigung, so dass ein Theil des Stromes durch das Galvanometer, der andere durch den anderen Zweig, den Nebenschluss, geht. — Es verhalten sich alsdann die Stromstärken in den beiden Zweigen umgekehrt, wie die Widerstände, also

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{w_2}{w_1}$$

und daher

$$\frac{i_1}{i_1 + i_2} = \frac{i_1}{I} = \frac{w_2}{w_1 + w_2}$$

$$i_1 = \frac{w_2}{w_1 + w_2} \cdot I$$

wenn I die gesammte Stromstärke, welche bestimmt werden soll, i_1 und w_1 Stromstärke und Widerstand im Galvanometer, i_2 und w_2 dieselben im Nebenschlusse bedeuten.

Ist nun z. B.

$$w_2 = \frac{1}{9} w_1,$$

so ist

$$\frac{w_2}{w_1 + w_2} = \frac{\frac{1}{9}}{1 + \frac{1}{9}} = \frac{1}{10}$$

also

$$i_1 = \frac{1}{10} I.$$

Man hat also die gefundene Stromstärke mit 10 zu multipliciren, um die Gesammt-Intensität zu erhalten. Statt des Verhältnisses $\frac{1}{9}$ nimmt man für entsprechende Fälle die Verhältnisse $\frac{1}{99}$, $\frac{1}{999}$ etc., welche der 100-, 1000- etc. fachen Gesammt-Stromstärke entsprechen. Zu grösserer Bequemlichkeit werden solche Nebenschluss-Widerstände zu einer Scala angeordnet und in einem

Kasten angebracht, welcher auf seinem Deckel eine Stöpsel-Einschaltung trägt, so dass man in aller Kürze jeden der Nebenschlüsse einschalten kann. Selbstverständlich ist ein solcher Nebenschluss-Kasten nur für das Galvanometer giltig, für welches er justirt ist, oder welches den gleichen Widerstand mit diesem hat.

9. Die Arbeits- und Wärmemesser.

Die früheren Instrumente beruhten alle auf dem Princip, dass die Stromstärke nach dem Drehungsmomente oder, wenn wir so sagen wollen, nach dem mechanischen Drucke, welchen ein Strom ausüben kann, gemessen wird. Es hindert nun aber nichts, sowohl die mechanische Kraft in anderer Weise als durch das Moment zu messen, als auch andere Wirkungen des Stromes zur Messung desselben zu benutzen.

Zunächst können wir statt des Momentes der Kraft die Arbeit derselben messen, wenn wir die Kraft zur Wirkung kommen lassen. Die Arbeit eines Stromes ist proportional dem Quadrate der Stromstärke und der Zeitdauer der Wirkung, es würde also das Verhältniss der Arbeit zur Zeit dem Quadrate der Stromstärke proportional sein. Das Product aus der Zeit in das Quadrat der Stromstärke ist aber auch proportional dem durch den Strom erzeugten Lichte und der Wärme.

Dieser Umstand ist von grosser Bedeutung für die praktische Elektrik, denn er gewährt die Möglichkeit, den Consum von Kraft zu messen. Stellen wir uns vor, dass künftig die Elektricität von Centralstellen aus den

einzelnen Häusern zugeleitet werden wird; dabei bedarf es dann offenbar, wie bei der Gasbeleuchtung der Gasuhr, auch einer Vorrichtung, um den Verbrauch an Elektricität seitens eines Abnehmers zu bestimmen, wenn man nicht etwa ein Pauschquantum festsetzen will, für das der Consument pro Monat oder Jahr zu zahlen hat, ein Modus, der aber wenig befriedigen dürfte.

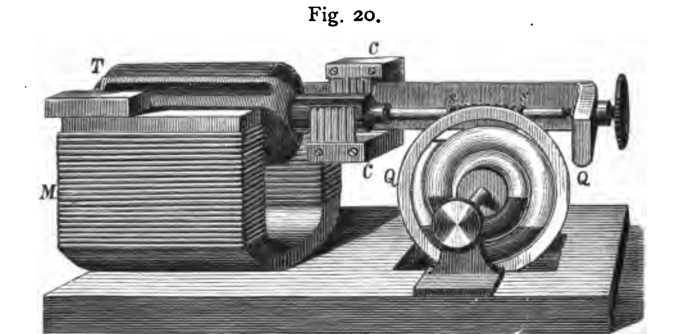
Für derartige Consummesser lassen sich mannigfache Constructionen erdenken, die sich auf das Princip gründen: Verwandlung eines festen Bruchtheiles der verbrauchten Elektricität in Arbeit und Messung dieser Arbeit. Die Construction eines solchen Quantitätsmessers ist die folgende, bei welcher vor Allem darauf Rücksicht genommen wurde, dass die angewendete Einheit der Arbeit auch wirklich immer dieselbe bleibe. Es soll das kurz erläutert werden. Setzt man den Strom in Kraft um und lässt diese Kraft eine Arbeit verrichten, so wird man diese Arbeit gewöhnlich so bestimmen, dass man den Weg, längs dessen die Kraftwirkung stattfindet, und den Druck misst. Am einfachsten gestaltet sich die Sache, wenn der Weg ein Kreisweg ist, weil ein solcher eine ganz beliebige Länge haben kann, ohne dass die directe Entfernung seiner Enden über eine gewisse Grenze hinauswächst, die Messung also nur einen beschränkten Raum in Anspruch nimmt. Man lässt demgemäss eine Kreisscheibe unter bekanntem Tangentialdruck rotiren und misst die Anzahl ihrer Rotationen. Als Tangentialdruck kann man die Reibung einer Bremse benutzen; bleibt dieselbe während der Umdrehungen constant, so wird auch die Anzahl der Umdrehungen proportional der geleisteten Arbeit sein. — Die Rotationszahl können wir ja leicht

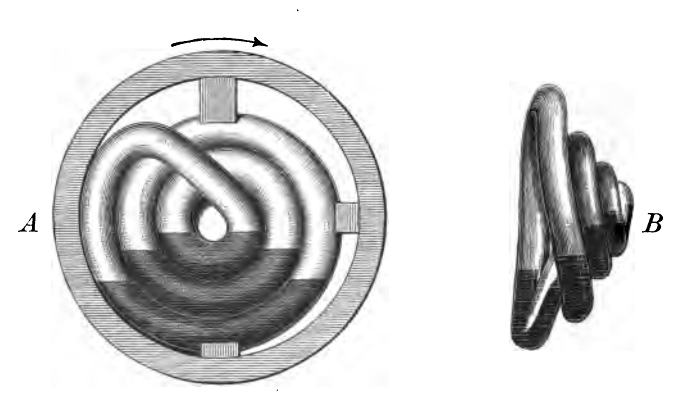
messen, indem wir die Räder mit einem Zählwerk verbinden. Haben wir also empirisch gefunden, wie viel Elektricität einer Umdrehung entspricht, so giebt uns die Anzahl der Umdrehungen den Consum der Elektricität an, vorausgesetzt, dass die Reibung während der Messung wirklich immer dieselbe war. Diese Voraussetzung können wir aber nicht machen, weil die Reibung sich mit der Zeit ändern kann, und wir müssen daher auf andere Mittel sinnen, der Arbeit eine solche Form zu geben, in welcher der zurückgelegte Weg oder die Anzahl der Umdrehungen proportional der Arbeit ist, in welcher also wirklich jede Weg-Einheit oder jede Umdrehung derselben Arbeit entspricht.

Zu diesem Zwecke diene eine kleine Vorrichtung, in welcher Quecksilber auf eine bestimmte Höhe gehoben wird und dann wieder herunterfällt, um aufs Neue gehoben zu werden. Diese Vorrichtung heisst »Arbeitsrädchen«, weil die Arbeit durch Drehung erfolgt und somit aus der Zahl der Umdrehungen die geleistete Arbeit ersehen werden kann. Dieses Arbeitsrädchen, das in Fig. 20 *A* und *B* dargestellt ist, besteht aus einem schneckenförmig gewundenen Glasrohr von 4 Mm. lichter Weite. Die beiden Enden sind, wie aus der Figur zu ersehen ist, mit einander vereinigt, indem eine gerade Röhre die Mitte der Schnecke mit dem Ende auf der Peripherie verbindet. Die Röhre enthält etwas Quecksilber und ist durch Auskochen luftleer gemacht. Dreht sich diese Schnecke in der Richtung des Pfeiles, so werden die einzelnen Quecksilber-Partien gehoben. Sie gelangen nach der Reihe in den mittelsten Theil und fallen von diesem aus durch das radiale Fallrohr wieder in den peripheralen

Theil, um von hier aus aufs Neue gehoben zu werden. Nach n Umgängen wird also die gesammte Menge Quecksilber, also ein bestimmtes Gewicht, auf eine

Fig. 20.





bestimmte Höhe gehoben sein. Die n Umgänge repräsentiren also ein festes Mass Arbeit. Es ist jedoch der Voraussetzung hierbei zu genügen, dass die Höhe des mittleren Endes in Bezug auf das untere, peripherale Ende stets constant erhalten wird. Das Instrument er-

fordert daher eine stationäre Aufstellung und ist z. B. für Fahrzeuge nicht zu gebrauchen.*)

Die weiteren Constructionstheile des Quantitätsmessers sind folgende: der Magnet *M*, um welchen die Hauptleitung in einigen Windungen führt, wirkt auf den zwischen Spitzen laufenden Anker *T*, welcher aus vier Drahtpartien besteht, die mit dem Commutator *c c* in Verbindung sind. Der Anker ist als Zweigleitung zwischen der Eintritts- und Austrittsstelle des Magnetes *M* eingeschaltet. An der Axe des Ankers sitzt die sorgfältig gearbeitete und polirte Schraube *s s*, welche in ein ebenfalls genau gearbeitetes Zahnrad des Arbeitsrädchens *Q Q* eingreift und die Bewegung dadurch auf das Rädchen überträgt. Fig. 20 giebt eine Skizze des Quantitätsmessers. In derselben ist das Zählwerk, welches die Anzahl der Umdrehungen des Arbeitsrädchens registrirt, fortgelassen. Die Umdrehungen werden in diesem Zählwerk nicht durch mechanische Uebertragung markirt, sondern, damit alle Reibung und variable Arbeit möglichst vermieden wird, durch elektrische Uebertragung. Es ist also ein elektrisches Uhrwerk, zu dessen Betrieb der zu messende Strom benutzt wird.

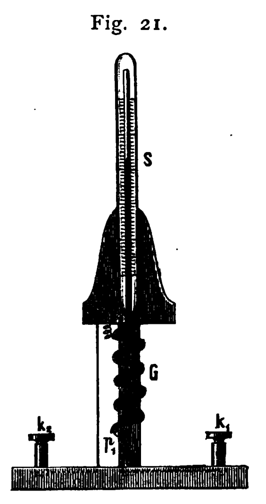
Zur Justirung des Instrumentes ist in die Zuleitung zum Anker ein variabler Widerstand und zwischen dem Eingang und Ausgang des Magnetes *M* ein variabler Nebenschluss eingeschaltet. Hierdurch kann man das Instrument immer so justiren, dass eine bestimmte Anzahl Umdrehungen des Arbeitsrädchens einer bestimmten Quantität Elektricität entspricht.

---

*) In der Figur ist eine kleine Einknickung des centralen Theiles nicht sichtbar, durch welche der Fall des Quecksilbers so lange aufgehalten wird, bis das Fallrohr senkrecht steht.

Um die Wärmewirkung des Stromes zur Messung zu benutzen, kann man sich des folgenden einfachen Instrumentes bedienen, — An die Thermometer-Röhre *S*, Fig. 21, ist die spiralförmig gebogene Glas-Röhre *G* gesetzt. In diese Glasröhre sind zwei Platindrähte p_1 und p_2 eingeschmolzen, der eine an dem Ende der Röhre, der andere an der Verbindungsstelle der gebogenen Röhre mit der Thermometer-Röhre. Das Ganze ist theilweise mit Quecksilber gefüllt und durch Kochen luftleer gemacht; es stellt also ein Thermometer dar, dessen Quecksilbergefäss spiralförmig gewunden ist. Geht nun ein Strom von dem Drahte p_1 nach dem Drahte p_2, so wird der dazwischen liegende Quecksilberfaden erwärmt, und die Erwärmung wird proportional sein dem Quadrate der Intensität und der Zeit der Wirkung des Stromes. Nimmt man bei den Messungen darauf Rücksicht, stets die nämliche Zeit für die Wirkung zu verwenden, so werden sich zwei so gemessene Stromstärken verhalten, wie die Wurzeln der Grade, um welche das Quecksilber im Thermometer gestiegen ist. — Wie die Elektro-Dynamometer und Arbeitsmesser ist das Elektro-Thermometer nicht von der Richtung der Ströme abhängig. Das Instrument, das von der Firma Schulz & Heinz in Ilmenau i. Th. in ausgezeichneter Ausführung angefertigt wird, empfiehlt sich wegen der Einfachheit seiner Construction als

Fig. 21.



Collegien-Apparat zur Demonstration des Joule'schen Gesetzes; auch kann es, wenn auch in beschränktem Masse, zur Messung der Stromstärke benutzt werden.

III.

Die Messung des Widerstandes.

1. Der Widerstand.

Die Messungen des Widerstandes unterscheiden sich in einer Hinsicht sehr erheblich von denen der Stromstärke. Die Stromstärke messen wir nämlich, indem wir ihre mechanische, chemische oder thermische Wirkung messen, wir können sie also nicht direct mit irgend einer gewählten Einheit vergleichen, sondern müssen uns aus den Wirkungen eine Intensitäts-Einheit künstlich construiren, die also eine ideale ist. Dem Zwecke der Messung thut dies keinen Abbruch, umso weniger, als die Bestimmung der Intensität überhaupt nur geschieht, um eine Bestimmung ihrer Wirkung zu haben.

Anders liegt die Sache bei dem Widerstande. Hier können wir uns eine greifbare Einheit schaffen, mit welcher andere Widerstände gemessen werden können, indem wir den Widerstand eines begrenzten Leiters als die Einheit für alle Widerstandsmessungen ansehen, in gleicher Weise, wie wir den Normal-Metermassstab als die Einheit für alle Längenmessungen betrachten.

Während wir also bei den Stromstärke-Messungen nur zu einem Vergleichen zweier Stromstärken, nicht aber zu einem wirklichen Messen gelangen konnten, weil uns eine reelle Stromstärke-Einheit fehlte, die ja nach Abschnitt 1 zum Messen nothwendig ist, können wir bei Messungen des Widerstandes unsere Vergleichungen an einer reellen Einheit vornehmen und somit directe Messungen des Widerstandes erzielen. Gegenüber der Stromstärke, welche nur eine definirte Einheit hat, hat der Widerstand eine materielle. Dies gründet sich darauf, dass jeder Leiter der Elektricität ein gewisses Mass Widerstand darbietet, welches von seinen Dimensionen und von seiner chemischen und physikalischen Beschaffenheit abhängt.

Das Gesetz, das diese Abhängigkeit ausdrückt, ist ein sehr einfaches und wird durch die Formel

$$w = \frac{l}{c\,q}$$

ausgedrückt, in welcher w den Widerstand, l die Länge, q den Querschnitt und c eine dem Stoffe des Leiters eigenthümliche Constante bedeutet, welche man die Leitungsfähigkeit des Stoffes heisst. Es ist hierbei angenommen, dass der Querschnitt und die Leitungsfähigkeit für die untersuchte Länge constant bleiben, andernfalls würden wir die obige Formel für jedes kleinste Theilchen anwenden müssen, um dann nachher den Gesammtwiderstand als die Summe aller infinitesimalen Theile zu finden. Wir haben jedoch für die Praxis einen solchen Ausdruck, welcher die Anwendung der Integralrechnung erfordert hätte, nicht nöthig, weil es sich hier meistens um Leiter mit constantem Querschnitt

und constanter Leitungsfähigkeit handelt, insbesondere um Drähte, deren Widerstand aus der bekannten Leitungsfähigkeit ihres Metalles berechnet werden soll.

Der obige Ausdruck $w = \frac{l}{c\,q}$ lautet in Worten: Der Widerstand ist proportional der Länge, umgekehrt proportional dem Querschnitte und der Leitungsfähigkeit. Ist also für einen Leiter von einem gewissen Querschnitte der Widerstand eines Theiles desselben von der Länge L_1 bestimmt, so werden sich die Widerstände von anderen Strecken dieses Drahtes so zu dem ersteren Widerstande verhalten, wie ihre Längen zu L_1. Hatten wir den Widerstand von L_1 als Einheit angenommen, so ergiebt das Verhältniss der Strecken zu L_1 unmittelbar die Zahl, welche den Widerstand in der gewählten Einheit ausdrückt. Z. B. soll der Widerstand von einem Meter Kupferdraht von der Dicke 1 Mm. als Einheit gelten; dann werden 100 Meter desselben Drahtes den Widerstand 100 haben.

Vergleichen wir dagegen Drähte von verschiedener Stärke bei gleicher Länge der Stücke, so werden sich nach obigem Gesetze die Widerstände umgekehrt wie die Querschnitte verhalten. Ein Kupferdraht von 10 Mm. Dicke, der also nach bekannten mathematischen Regeln den 100fachen Querschnitt eines Drahtes von 1 Mm. Dicke hat, wird also nur ein Hundertstel des Widerstandes des letzteren Drahtes haben, oder 100 Mtr. des 10 Mm.-Drahtes werden so viel Widerstand haben wie 1 Mtr. des 1 Mm.-Drahtes.

Dies giebt uns ein bequemes Verfahren an die Hand, beliebige Theile einer Widerstandsgrösse herzu-

stellen. Wir haben uns nur zu denken, dass ein gleichförmiger Draht, dessen Widerstand bekannt ist, in gleiche Theile getheilt ist; ist n die Anzahl der Theile, so wird jeder Theil ein n-tel des Widerstandes des ganzen Drahtes repräsentiren.

Ist der Draht zum Beispiel 1 Mtr. lang, so stellt jeder Millimeter dieses Drahtes ein Tausendstel des Widerstandes des Drahtes dar. Diese bequeme Theilbarkeit des Widerstandes ist von grosser Bedeutung für die Widerstandsmessungen, wie wir später sehen werden, weil wir aus den leicht und genau auszuführenden Längenmessungen auf das Verhältniss zweier Widerstände schliessen können; sie leidet aber an dem Uebelstande, dass die Voraussetzung des constanten Querschnittes und der constanten Leitungsfähigkeit für die ganze Länge der beiden zu vergleichenden Widerstände nicht immer zutrifft. Wenn ein Draht auch noch so sorgfältig gearbeitet ist und auf seiner ganzen Länge einen gleichen Querschnitt aufweist, so kann doch bei seiner Herstellung die Textur in ungleichförmiger Weise verändert worden sein, so dass die Leitungsfähigkeit der einzelnen Theilstrecken eine sehr wechselnde ist. Alsdann kann man aber nicht mehr sagen, dass gleiche Strecken dieses Drahtes auch gleiche Widerstände haben. Wird aber erst der Draht in Gebrauch genommen, so verändert jede äussere Einwirkung, welche beim Gebrauche kaum zu vermeiden ist, die Leitungsfähigkeit an den Stellen, wo diese Einwirkung stattfindet. Innerhalb gewisser Grenzen, welche durch die Rücksicht auf die erwähnten Uebelstände gegeben sind, bleibt jedoch die Theilung des Widerstandes mittelst Theilung der Länge erlaubt und

giebt ein werthvolles Mittel ab, Widerstands-Verhältnisse mittelst Längenmessung zu bestimmen.

Für die Einheit, welche den Widerstandsmessungen zu Grunde zu legen ist, sind im Laufe der Zeit zahlreiche Vorschläge gemacht worden. Eine weitere Verbreitung hat zuerst die Einheit von Jacobi gefunden, welcher den Physikern als Einheit den Widerstand eines cylindrischen Kupferdrahtes von 1 Mtr. Länge und 1 Mm. Durchmesser vorschlug. Bei der praktischen Einführung erwies sich jedoch dieser Vorschlag als unhaltbar, weil die verschiedenen Kupfersorten ganz erhebliche Abweichungen in ihren Leitungsfähigkeiten aufwiesen. Jacobi änderte darum seinen Vorschlag dahin ab, dass er einen Etalon von Kupferdraht herstellte, der, ähnlich wie der Normalmeter in Paris für Längenmessungen, für alle Widerstandsmessungen als Einheit dienen sollte Jacobi sandte dann diesen Etalon an verschiedene Physiker, damit diese sich genau bekannte Copien anfertigen könnten, und erreichte dadurch auch wirklich, dass die Physiker lange Zeit hindurch ihre Messungen in Jacobi'schen Einheiten ausdrückten. Als sich aber später herausstellte, dass sowohl Etalon wie Copien einer langsamen Aenderung mit der Zeit unterworfen seien, und daher Messungen, zwischen denen grössere Zeiträume lagen, nicht mehr mit einander verglichen werden konnten, war man genöthigt, auf zuverlässigere Einheiten zu sinnen. Siemens schlug vor, eine Quecksilber-Säule von bekannter Länge und bekanntem Querschnitt als Grundmass zu nehmen, weil die Länge und der Querschnitt jederzeit genau bestimmt werden können und reines Quecksilber bei gleicher Temperatur stets

die gleiche Leitungsfähigkeit habe, da es Structur-Veränderungen nicht unterworfen sei. — Als Einheit sollte der Widerstand einer Quecksilber-Säule von 1 Mtr. Länge und 1 Qu.-Mm. Querschnitt gelten. Diese Einheit könne leicht überall und zu jeder Zeit wegen der eben erwähnten Gründe reproducirt werden, und man sei somit nicht von einem einzelnen Urmasse abhängig.

Dieses Mass ist allgemein angenommen worden und hat bis jetzt, wo es durch das absolute Mass verdrängt wird, in der Praxis ausschliesslich gegolten.

Die absolute Einheit wurde zuerst von Weber aufgestellt und bestimmt. Durch die Initiative der British Association wurde sie in die Praxis eingeführt.

Die Einheit des Widerstandes, welche in absolutem Masse von der British Association aufgestellt wurde, erhielt den Namen »Ohmad« zu Ehren unseres um die Elektrik so hochverdienten Landsmannes Ohm. Jetzt bezeichnet man diese Einheit gewöhnlich kurz als Ohm. Das Verhältniss des Ohm zur Siemens-Einheit ist wie 1·06 zu 1.

Diese absolute Einheit ist hier nur kurz berührt worden, eine eingehende Darstellung der absoluten Masse der elektrischen Grössen soll für ein Anhang-Capitel vorbehalten bleiben.

2. Der Widerstand in Verzweigungen.

Für eine Darstellung der Messmethoden ist es unumgänglich nothwendig, die Widerstands-Verhältnisse, welche sich bei Verzweigungen des Stromes ergeben, kennen zu lernen. Es handelt sich hier um die Lösung

der Aufgabe, den Widerstand von zusammengesetzten Leitern zu finden, wenn wir die Widerstände der einzelnen Leiter kennen. Sind die Leiter hintereinander geschaltet, so ist die Lösung einfach, der Gesammtwiderstand ist gleich der Summe der einzelnen Widerstände. Verwickelter wird aber die Sache, wenn die einzelnen Leiter nebeneinander geschaltet sind, wenn also die sämmtlichen Anfänge der Leiter einerseits und die sämmtlichen Enden derselben andererseits zusammenstossen.

Um zu der Lösung dieser Aufgabe zu gelangen, denken wir uns, dass die Leiter, deren Länge mit l_1, $l_2, \ldots l_n$ deren Querschnitte mit $q_1, q_2, \ldots q_n$ und deren Leitungsfähigkeiten mit $c_1, c_2, \ldots c_n$ bezeichnet werden sollen, alle auf dieselbe Länge gebracht worden seien, ohne ihren Widerstand zu verändern. Das kann geschehen, indem wir proportional der Veränderung der Länge auch den Querschnitt verändern; denn bringe ich l auf a, und q auf $a\,q$, so bleibt der Widerstand

$$w = \frac{a\,l}{c\,.\,a\,q}$$

ungeändert, nämlich gleich $\frac{l}{c\,q}$

Um auch die Verschiedenheit der Leitungsfähigkeiten zu beseitigen, denken wir uns die nunmehr gleich langen Drähte durch andere ebenso lange ersetzt, bei denen die Leitungsfähigkeit für alle die gleiche, deren Querschnitt aber so geändert worden ist, dass der Widerstand des einzelnen Drahtes unverändert bleibt. Jetzt können wir alle diese Drähte als einen einzigen ansehen, dessen Länge die gemeinsame Länge der

einzelnen Drähte, dessen Querschnitt aber die Summe aller Einzelquerschnitte ist. Um die angedeuteten Verhältnisse rechnungsmässig darzustellen, setzen wir die Länge, auf welche alle Drähte gebracht werden sollen, gleich Eins. Vertauschen wir demgemäss l_1, $l_2 \ldots l_n$ mit der Länge Eins, so muss auch der Querschnitt proportional geändert werden, und statt $q_1, q_2, \ldots . q_n$ müssen wir setzen

$$\frac{q_1}{l_1}, \frac{q_2}{l_2} \ldots . \frac{q_n}{l_n}$$

In ähnlicher Weise verfahren wir mit der Leitungsfähigkeit. Wir setzen für alle Drähte die gemeinsame Leitungsfähigkeit Eins und müssen daher jedes c durch sich selbst dividiren und jedes q, um diese Veränderung wieder auszugleichen, mit seinem c multipliciren. Thatsächlich wird also an den $c\,q$ Producten nichts geändert, nur dass wir die Verhältnisszahl c dem Querschnitt zuweisen.

Wir erhalten nunmehr den Gesammtwiderstand W nach der Formel des Art. 1 dieses Abschnittes

$$W = \frac{L}{C\,Q}$$

L und C sind nach unserer Annahme gleich Eins. Q ist die Summe der einzelnen Querschnitte. Diese letzteren haben wir so erhalten, dass wir an Stelle von q_1 $q_2, \ldots q_n$ die Verhältnisse

$$\frac{c_1\,q_1}{l_1}, \frac{c_2\,q_2}{l_2} \ldots . \frac{c_n\,q_n}{l_n}$$

treten liessen. Der Gesammtwiderstand wird somit

$$W = \frac{1}{\frac{c_1\,q_1}{l_1} + \frac{c_2\,q_2}{l_2} + \ldots . + \frac{c_n\,q_n}{c_n}}$$

Nun ist nach dem Vorigen

$$\frac{c_1 q_1}{l_1}, = \frac{1}{w_1}, \quad \frac{c_2 q_2}{l_2} = \frac{1}{w_2} \quad \ldots \quad \frac{c_n q_n}{l_n} = \frac{1}{w_n}$$

und somit

$$W = \frac{1}{\frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2} + \ldots \frac{1}{w_n}}.$$

und hieraus ergiebt sich die endgiltige Formel für die Zusammensetzung eines Gesammtwiderstandes aus den einzelnen Zweigwiderständen, nämlich

$$W = \frac{w_1 \, w_2 \, w_3 \ldots w_n}{w_2 \, w_3 \ldots w_n + w_1 \, w_3 \ldots w_n + \ldots}$$

Für den Fall $n = 2$, welcher der häufigste ist, ergiebt unsere Formel

$$W = \frac{w_1 \, w_2}{w_1 + w_2}$$

in Worten: der Gesammtwiderstand ist gleich dem Producte der Einzelwiderstände, dividirt durch die Summe derselben.

Durch die Verschiedenheit der Widerstände in den Zweigen wird auch die Stromstärke in denselben eine verschiedene sein. Es tritt nämlich durch jeden Theil des Querschnittes eines Leiters die gleiche Menge Elektricität während der Zeit-Einheit, wenn die Theile gleich sind, oder falls das nicht der Fall, solche Quantitäten Elektricität, die der Grösse des respectiven Theiles proportional sind. Unsere gesammten Zweige repräsentirten aber einen Leiter von der Länge und Leitungsfähigkeit Eins und dem Querschnitte

$$Q = \frac{c_1 \, q_1}{l_1} + \frac{c_2 \, q_2}{l_2} + \ldots + \frac{c_n \, q_n}{l_1}.$$

Durch jeden einzelnen Querschnitt tritt somit eine solche Quantität Elektricität in der Zeit-Einheit, die diesem Querschnitt proportional ist. Bei zwei Querschnitten

$$\frac{c_1\,q_1}{l_1} \text{ und } \frac{c_2\,q_2}{l_2}$$

wird also das Verhältniss der beiden durch sie in der Zeit-Einheit hindurchgehenden Elektricitätsmengen

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{\frac{c_1\,q_1}{l_1}}{\frac{c_2\,q_2}{l_2}}$$

oder gleich $\frac{w_2}{w_1}$. Die in der Zeit-Einheit durch einen Querschnitt tretenden Elektricitätsmengen sind aber bekanntlich das Mass der Stromstärken, und so erhalten wir den Satz, dass die Stromstärken i_1 und i_2 in zwei Zweigen 1 und 2 sich umgekehrt verhalten wie die Widerstände w_1 und w_2 der beiden Zweige.

Durch Kirchhoff sind zwei einfache Sätze aufgestellt worden, die auch bei den verwickeltsten Verzweigungs-Verhältnissen eine leichte Bestimmung der Widerstände und Stromstärken ermöglichen. Der erste dieser Sätze lautet folgendermassen: An jedem Punkte eines Leiters muss ebenso viel Elektricität ab- als zufliessen, denn andernfalls würde eine Anhäufung von Elektricität entstehen. Gehen also von einem Punkte C eine Anzahl Leitungen aus, in denen theils Elektricität dem Punkte C zugeführt, theils abgeleitet wird, so müssen die Summen der zuströmenden Elektricitäten denen der fortströmenden gleich sein. Nach der Definition von Stromstärke wird aber die Menge der in einer Leitung

zu- oder fortgeführten Elektricität proportional der Stromstärke in dieser Leitung. Sind also I_1, $I_2 \ldots I_n$ die Stromstärken in den Leitungen, in welchen der Strom dem Punkte C zuströmt, und i_1, $i_2 \ldots i_n$ die Stromstärken in den Leitungen, in welchen der Strom von dem Punkte C abströmt, so ist

$$I_1 + I_2 + \ldots + I_n = i_1 + i_2 + \ldots + \ldots + i_n$$

$$\text{oder } I_1 + I_2 + I_n \ldots - i_1 - i_2 - i_n = 0.$$

Wir erhalten also den Satz: Kreuzen sich in einem Punkte beliebig viele Ströme, so ist die Summe der Stromstärken, die zuströmenden mit entgegengesetztem Vorzeichen als die abströmenden genommen, gleich Null.

Der zweite Kirchhoff'sche Satz bezieht sich auf Ströme, welche eine geschlossene Linie bilden. Derselbe lautet: Multiplicirt man für jedes Stück des geschlossenen Leiters die Intensität in diesem Stücke mit seinem Widerstande, so ist die Summe sämmtlicher Producte gleich den in dem geschlossenen Leiter auftretenden elektromotorischen Kräften oder

$$i_1 w_1 + i_2 w_2 + \ldots + i_n w_n = E.$$

Zum Beweise dieses Satzes müssen wir einen Satz über die elektromotorische Kraft, welche im Weiteren behandelt werden soll, anticipiren. Derselbe besagt, dass die elektromotorische Kraft zwischen zwei Punkten gleich der Differenz der Spannungen an jenen Stellen ist. Werden dieselben mit E_1 und E_2 bezeichnet, so ist die Stromstärke in dem Stücke zwischen den beiden Punkten

$$i_1 = \frac{E_1 - E_2}{w_1} \quad i_1 w_1 = E_1 - E_2$$

wenn w_1 den Widerstand des betreffenden Stückes ausdrückt. Das nächste Leiterstück wird die Spannungs-Differenz $E_2 - E_3$, wenn zwischen beiden Leiterstücken nicht Spannungs-Differenz der Berührungsstellen statt hat. Es wird daher auch $i_1 w_1 + i_2 w_2 = E_1 - E_3$ und daher, falls wir die Summe über einen ganzen geschlossenen Leiter nehmen,

$$i_1 w_1 + i_2 w_2 + \ldots + i_n w_n = E_1 - E_2 + E_2 - E_3 \ldots$$
$$\ldots\ldots - E_n + E_n - E_1 = 0.$$

Sobald aber elektromotorische Kräfte im Kreise auftreten, heben sich die Spannungen nicht mehr gegenseitig auf, sondern ihr Unterschied wird gleich der in dem geschlossenen Leiter auftretenden elektromotorischen Kraft, und wir erhalten als endgiltigen Ausdruck des zweiten Kirchhoff'schen Gesetzes

$$\Sigma i w = \Sigma E.$$

Mit Hilfe der Kirchhoff'schen Sätze wird es im Folgenden leicht sein, uns über Stromverhältnisse in allen Fällen klar zu werden, da dieselben leicht die nöthige Anzahl Gleichungen liefern, die zur Ermittelung der Unbekannten nothwendig sind.

3. Die Bestimmung des Widerstandes mittelst Stromstärke-Messungen.

Die Ohm'sche Formel giebt uns die Mittel an die Hand, Widerstände zu bestimmen. Aus dieser Formel folgt nämlich, dass der Widerstand gleich ist dem Verhältnisse $\frac{E}{I}$, wo E die elektromotorische Kraft und I die

Stromstärke bedeutet. Zwei Widerstände, w_1 und w_2, verhalten sich also wie

$$\frac{\frac{E_1}{I_1}}{\frac{E_2}{I_2}}$$

Wenn wir nun dafür Sorge tragen, dass $E_1 = E_2$ ist, so werden sich zwei Widerstände umgekehrt zu einander verhalten, wie die Stromstärken, die ihnen entsprechen. Um hiernach zwei Widerstände miteinander zu vergleichen, schalten wir sie nacheinander in den Stromkreis einer möglichst constanten Elektricitätsquelle ein. Es ist dann, wenn W den übrigen Widerstand des Stromkreises, w_1 und w_2 die beiden zu vergleichenden Widerstände bezeichnen

$$I_1 = \frac{E}{W + w_1} \quad I_2 = \frac{E}{W + w_2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{W + w_2}{W + w_1}.$$

Ist W so klein, das es neben w_1 und w_2 vernachlässigt werden kann, so können wir das Verhältniss w_1 zu w_2 dem umgekehrten Verhältnisse

$$\frac{I_2}{I_1}$$

gleich setzen. Kennt man aber W nicht und würde seine Vernachlässigung zu grosse Ungenauigkeit herbeiführen, so bestimmen wir noch ausserdem die Stromstärke, wenn W allein in dem Stromkreis eingeschaltet ist. Ist diese $= I$, so erhalten wir die drei Gleichungen

$$I = \frac{E}{W}; \; I_1 = \frac{E}{W + w_1}; \; I_2 = \frac{E}{W + w_2}$$

hieraus folgt

$$\frac{I}{I_1} = \frac{W + w_1}{W}; \quad \frac{I}{I_2} = \frac{W + w_2}{W}$$

und weiter

$$\frac{I - I_1}{I_1} = \frac{w_1}{W}; \quad \frac{I - I_2}{I_2} = \frac{w_2}{W}$$

und schliesslich

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{I_2\,(I - I_1)}{I_1\,(I - I_2)}.$$

Einfacher gestaltet sich diese Methode noch, wenn wir einen sogenannten Rheostaten anwenden. Es ist dies ein Leiter mit veränderlichem, aber bekanntem Widerstande, welcher in den Stromkreis eingeschaltet wird. Betreffs der Construction desselben verweisen wir auf Art. 5 dieses Abschnittes.

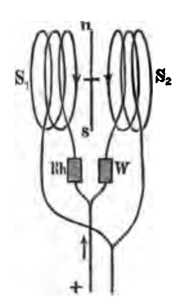
Um mit Hilfe eines Rheostaten den Widerstand eines Drahtes zu bestimmen, schalten wir zunächst den unbekannten Widerstand in den Strom ein und bestimmen die Stromstärke. Darauf wird der unbekannte Widerstand mit dem Rheostaten vertauscht und der Widerstand desselben so lange verändert, bis man an dem Mess-Instrumente die frühere Stromstärke beobachtet. Alsdann ist der zu bestimmende Widerstand gleich dem eingeschalteten des Rheostaten.

Diese Methoden sind aber, wie schon gesagt, nur unter der Voraussetzung anwendbar, dass die elektromotorische Kraft constant bleibt, eine Voraussetzung, die selbst bei den zuverlässigsten Batterien nicht zutrifft. Aus diesem Grunde hat man Methoden ersonnen, bei denen beide Widerstände bei der Messung gleichzeitig

in den Stromkreis eingeschaltet sind, also stets bei derselben elektromotorischen Kraft verglichen werden.

Von diesen Methoden soll zuerst die Messung mittelst des Differential-Galvanometers (vergl. Seite 29) besprochen werden. Bei diesem Verfahren theilt man den Strom in zwei Zweige; in dem einen Zweig ist der Widerstand und die erste Rolle des Galvanometers, in dem anderen der Rheostat und die zweite Rolle eingeschaltet. Hinter dem Galvanometer vereinigen sich die beiden Zweige wieder und führen zur Batterie zurück. Fig. 22 giebt die Anordnung in schematischer Darstellung.

Fig. 22.



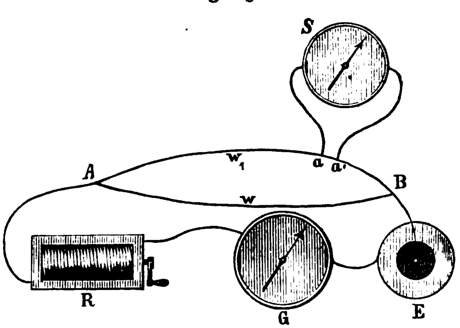
Bei der Herstellung der Zweige hat man darauf Acht, dass ausser den Widerständen der Rollen und den zu vergleichenden andere Widerstände möglichst vermieden werden, zu welchem Zwecke alle nöthig werdenden Verbindungen aus kurzem und dickem Drahte gemacht werden, dessen Widerstand vernachlässigt werden kann. Wo das durch die Verhältnisse unmöglich gemacht ist, muss der Widerstand der Zuleitungen in Rechnung gezogen werden.

Zur Messung des Widerstandes wird nun der Rheostat so lange geändert, bis die Ablenkung im Differential-Galvanometer verschwunden ist. Dies tritt ein, wenn die einander entgegengesetzten Wirkungen der beiden Rollen auf die Nadel gleich sind, was bei gleicher Stromstärke in beiden Rollen der Fall sein wird. Dieses setzt wiederum voraus, dass die Widerstände in beiden Zweigen gleich sind, und sind diese gleich, so muss, da die Widerstände

beider Rollen gleich sind, auch der zu messende Widerstand mit dem im Rheostaten gleich sein.

Diese Methode empfiehlt sich durch ihre Einfachheit und rasche Ausführung; sie leidet aber an dem Fehler, dass die beiden Widerstände nur dann bei gleichen Stromstärken einander gleich werden, wenn die Wirkungen der beiden Rollen auf die Nadel einander gleich sind. Ist das nicht der Fall, so kann man doch diese Methode noch an-

Fig. 23.



wenden, indem man das Verhältniss der Stromstärken bestimmt, für welche die beiden Rollen gleich stark auf die Nadel einwirken. Immerhin bleibt aber die Verschiedenheit der Wirkungen beider Rollen eine Fehlerquelle, welche für feinere Messungen die dargestellte Methode als weniger geeignet erscheinen lässt.

Bosscha hat eine Methode angegeben, welche grosser Genauigkeit fähig ist. In einem Stromkreise, Fig. 23, ist der Widerstand w, der Rheostat R und das Galvanometer G eingeschaltet. Zwischen den Endpunkten A und B des Widerstandes w ist der Widerstand w_1 eingeschaltet, der also eine Zweigleitung des Stromes bildet.

Ist nun I die Stromstärke in dem unverzweigten Stromkreise, i in dem Zweige AB und i_1 in dem anderen Zweige AaB, so ist

$$I = i + i_1; \ \frac{i}{i_1} = \frac{w_1}{w}; \ i_1 = I \frac{w}{w + w_1}.$$

I kann mittelst des Galvanometers G bestimmt werden. Schaltet man nun in den Zweig AaB den Widerstand r ein, so sinkt i_1. Durch Ausschaltung von Widerstand am Rheostaten R wird aber die Stromstärke im ungetheilten Stromkreise steigen, und hierdurch kann man bewirken, dass die Stromstärke in AaB die frühere i_1 wird. Es sei das der Fall für eine Stromstärke I_1 im ungetheilten Strome. Dann ist

$$i_1 = \frac{w}{w + w_1 + r} I_1.$$

Zusammen mit der früher erhaltenen Gleichung bekommen wir

$$I \frac{w}{w + w_1} = I_1 \frac{w}{w + w_1 + r}$$

oder

$$\frac{r}{w + w_1} = \frac{I_1 - I}{I}$$

Schaltet man nun einen anderen Widerstand r_1 statt r ein, und verändert den Rheostaten R wieder, bis im Zweige AaB die Stromstärke wieder i_1 ist, so ist, wenn nun die Stromstärke im ungetheilten Stromkreise I_2 ist,

$$i_1 = \frac{w}{w + w_1 + r_1}$$

und

$$\frac{r_1}{w + w_1} = \frac{I_2 - I}{I}$$

woraus folgt

$$\frac{r_1}{r} = \frac{I_2 - I}{I_1 - I}.$$

Für die Genauigkeit der Methode ist es nothwendig, dass die Differenz $I_2 - I$ möglichst gross ist, weil die Beobachtungsfehler alsdann weniger ins Gewicht fallen. Zu diesem Zwecke muss der Widerstand w_1 sehr klein gegen r_1 gemacht werden. Um nun den Widerstand w_1 nicht unnöthig durch Einschaltung eines Galvanometers zu vermehren, bringt Schröder van der Kolk das Galvanometer G_1 als Nebenschluss an, wodurch der Widerstand w_1 sogar noch etwas vermindert wird.

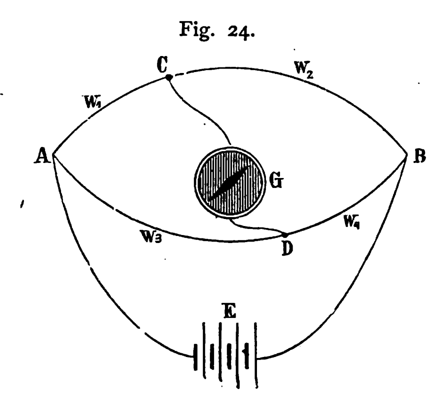
4. Die Brücken.

Die bequemste und jetzt am häufigsten benutzte Methode bietet sich uns in der Brückenmethode dar, bei welcher sich, wie beim Differential-Galvanometer, die Stromstärken-Beobachtung auf die Feststellung reducirt, dass die Nadel keine Wirkung mehr erfährt und in der Ruhelage verbleibt. Das Princip der Brückenmethode beruht darauf, dass, wenn ein Strom sich verzweigt, in zwei Zweigen zwei Punkte gefunden werden können, zwischen denen kein Strom weder herüber noch hinüber fliesst, wenn sie leitend verbunden werden. Jeder dieser Punkte theilt seinen Zweig in zwei Theile, und die Widerstände dieser Theile stehen unter sich in einem ganz bestimmten Verhältniss, so dass, wenn wir einen dieser Widerstände und das Verhältniss der beiden anderen kennen, wir den vierten Widerstand leicht berechnen können.

Der einfachste dieser Fälle ist der in Fig. 24 schematisch dargestellte. Der von der Batterie E kommende Strom verzweigt sich bei A und seine beiden Zweige ver-

einigen sich wieder bei B. Denken wir uns einmal, wir hätten keinen elektrischen, sondern einen Wasserstrom vor uns, der bei E durch eine Pumpe in die Höhe gehoben wird und auf dem angedeuteten Wege wieder zur Pumpe zurückfliesst. Von den beiden Zweigen soll der eine kurz, der andere lang sein. Nehmen wir nun in dem einen Zweige irgend einen Punkt an, so wird im anderen Zweige ein zweiter Punkt existiren, welcher in derselben

Fig. 24.



Höhe mit dem ersten Punkte liegt. Werden diese beiden Punkte miteinander durch eine Röhre verbunden, so wird in derselben keine Strömung stattfinden. Genau das Gleiche ist bei dem elektrischen Strome der Fall, bei dem auch für jeden Punkt des einen Zweiges ein anderer Punkt des anderen Zweiges existirt, welcher mit dem ersten Punkte sozusagen in derselben elektrischen Höhe liegt, so dass kein Strom zwischen beiden entstehen kann. Es soll nun C der eine Punkt sein, welchem der Punkt D des anderen Zweiges entspricht. Die Widerstände AC und CB sollen w_1 und w_2, zwischen AD und DB w_3 und w_4 sein. Es

fragt sich nun, in welchem Verhältniss stehen die vier Widerstände zu einander. Um das zu ermitteln, benutzen wir die Kirchhoff'schen Sätze. Sind I_1, I_2, I_3 und I_4 die Stromstärken in den vier Leiterpartien, so ist für den Fall, dass die Stromstärke in CD, in dem sogenannten Brückendrahte, gleich Null ist,

$$I_1 - I_2 = 0 \qquad I_3 - I_4 = 0$$

$$I_1 w_1 - I_3 w_3 = 0 \qquad I_2 w_2 - I_4 w_4 = 0$$

$$\frac{w_1}{w_3} = \frac{I_3}{I_1} \qquad \frac{w_2}{w_4} = \frac{I_4}{I_2} = \frac{I_3}{I_1}$$

$$\frac{w_1}{w_3} = \frac{w_2}{w_4}$$

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{w_3}{w_4}$$

Es gilt also der Satz: Sind zwei Punkte C und D der angedeuteten Verzweigung durch einen Brückendraht verbunden, so wird in diesem Drahte kein Strom sein, wenn die beiden Widerstände oberhalb der Brücke im gleichen Verhältniss zu den Widerständen unterhalb stehen, wenn also $\frac{w_1}{w_2} = \frac{w_3}{w_4}$ ist. — Aus dem Verschwinden des Stromes im Brückendrahte ersehen wir also, dass die Gleichheit der Verhältnisse eingetreten ist.

Diese Combination ist zuerst von Wheatstone angegeben und von ihm zur Bestimmung von Widerständen benutzt worden. Daher trägt auch die in Fig. 24 dargestellte Schaltungsweise den Namen der Wheatstone'schen Brücke.

Für die Benutzung derselben stehen uns zwei Wege offen. Soll z. B. der Widerstand w_4 bestimmt werden,

so können wir erstens das Verhältniss $\frac{w_1}{w_2}$ ungeändert lassen und w_3 so lange variiren, bis der Brückendraht stromlos geworden ist. Oder wir können für w_3 einen festen Widerstand nehmen und $\frac{w_1}{w_2}$ abändern, bis das Galvanometer die Gleichheit der Verhältnisse anzeigt. Endlich können wir aber auch beide Bestimmungsweisen combiniren.

Der Gebrauch der Brücke ist nach dem Gesagten ziemlich einfach. Für w_1 und w_2 nimmt man zwei Widerstände, die in einem einfachen Verhältnisse, z. B. $^1/_1$, $^1/_{10}$ $^1/_{100}$, $^1/_{1000}$ stehen. Den Widerstand w_3 vertritt eine Widerstandsscala, mittelst welcher beliebige Widerstände eingeschaltet werden können. Alle Zuleitungen werden aus möglichst dicken und kurzen Drähten gemacht, damit unbekannte Widerstände in den Zweigen, die zu Fehlern Anlass geben, vermieden werden. Das in den Brückendraht eingeschaltete Galvanometer muss möglichst empfindlich sein, um noch schwache Ströme nachweisen zu können; man bedient sich zu diesem Zwecke eines Multiplicators oder eines Spiegel-Galvanometers. Für den Fall, dass man die Widerstände w_1 und w_2 gleich gemacht hat, kann man durch eine einfache Vorrichtung die Widerstände w_1 und w_2 mit einander vertauschen, so dass w_2 nun oberhalb der Brücke zu liegen kommt, wo vorher w_1 lag. Es geschieht das, weil die Justirung von w_1 und w_2 nie eine so vollkommene ist, dass man $w_1 = w_2$ setzen kann. Hat man nun durch Regulirung von w_3 die Nadel des Galvanometers in die Ruhelage zurückgebracht, so müsste sie darin bleiben, wenn unter Vor-

aussetzung von $w_1 = w_2$, w_1 und w_2 mit einander vertauscht werden. Die Entfernung der Nadel von ihrer Ruhelage bei der Vertauschung zeigt an, dass w_1 und w_2 um ein Weniges verschieden sind. Ermittelt man aufs Neue den Werth w_3', für welchen der Strom in dem Brückendraht verschwindet, so kann man als den richtigsten Werth von w_4 das arithmetische Mittel von w_3 und w_3' nehmen.

Um sich genauer zu überzeugen, dass der Strom im Brückendrahte verschwunden ist, wechselt man die Richtung des Stromes in der Hauptleitung; wird hierdurch die Nadel nicht afficirt, so ist der Brückendraht in der That stromlos. — Dieses Verfahren hat einen Uebelstand, der namentlich bei kleinen Widerständen störend auftritt. Der zu messende Widerstand w_4 wird meistens so an die Brücke gelegt, dass man ihn mit Klemmschrauben mit derselben in Verbindung bringt. Bei dieser Verbindung treten aber an den Klemmschrauben kleine Widerstände auf, die nicht in Rechnung gezogen werden können. Wo es sich um grössere Widerstände handelt, verschwinden diese Uebergangswiderstände; sind jedoch die zu messenden Grössen sehr kleine, so fällt der Uebergangswiderstand erheblich ins Gewicht und macht die Messung ungenau.

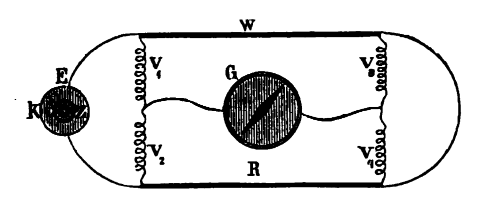
Diesem Uebelstande begegnet Thomson in seiner Brücke, die sich als eine Erweiterung der Wheatstone'schen erweist. Die schematische Darstellung dieser Schaltungsweise ist in Fig. 25 gegeben.

Die beiden zu vergleichenden Widerstände W und und R, von denen wir W als den unbekannten annehmen wollen, sind hintereinander in den Stromkreis geschaltet.

Das Eintrittsende von W ist mit dem Austrittsende von R, und in gleicher Weise das Austrittsende von W mit dem Eintrittsende von R durch Zweige verbunden.

Zwischen zwei Punkten dieser Zweigleitungen ist der Brückendraht eingeschaltet. Sind nun die Widerstände oberhalb und unterhalb der Brücke bei dem einen Zweigdrahte v_1 und v_2, bei dem anderen v_3 und v_4, und sind ferner die Stromstärken in den einzelnen Theilen I_W, I_R, I_1, I_2, I_3, I_4 und I, welch letzteres die Strom-

Fig. 25.



stärke in dem Hauptverbindungsdraht zwischen W und R sein soll, so erhalten wir aus den Kirchhoff'schen Sätzen, falls die Stromstärke im Brückendrahte $= 0$ ist:

$$I_W - I_3 - I = 0 \qquad I_R - I_4 - I = 0$$

$$I_1 = I_2 \qquad I_3 = I_4$$

$$W\, I_W + v_3\, I_3 - v_1\, I_1 = 0 \qquad R\, I_R + v_4\, I_4 - v_2\, I_2 = 0$$

$$\frac{W}{R} = \frac{I_R}{I_W} \quad \frac{v_1\, I_1 - v_3\, I_3}{v_2\, I_2 - v_4\, I_4}$$

Da nun $I_W = I_R$ ist, so erhalten wir

$$\frac{W}{R} = \frac{v_3}{v_4} \cdot \frac{\frac{v_1}{v_3} - \frac{I_3}{I_1}}{\frac{v_2}{v_4} - \frac{I_4}{I_2}}$$

Sind nun die Nebenleitungen so getheilt, dass

$$\frac{v_1}{v_3} = \frac{v_2}{v_4}$$

ist, so wird der zweite Factor des obigen Ausdruckes, da $I_1 = I_2$ und $I_3 = I_4$, gleich Eins, und somit auch

$$\frac{W}{R} = \frac{v_3}{v_4} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Der Uebergangs-Widerstand an den Stellen, an welchen die Zweigleitungen anliegen, kommt hierbei nicht in Betracht, da er gegenüber den Widerständen v_1, v_2, v_3 und v_4, welche möglichst gross gemacht werden, als verschwindend angesehen werden kann. Auf die Grösse der Widerstände W und R hat er aber gar keinen Einfluss, da diese nur davon abhängen, wie viel Widerstand die Contactpunkte abgrenzen, nicht aber davon, ob diese Contacte die Zweigströme gut ableiten oder nicht. Es bedarf also nur einer scharfen Bestimmung der Contactorte. Zu diesem Zwecke werden Contactstücke in Form von Schneiden an die Leiter W und R gelegt, welche den Contactort also scharf markiren, ohne wegen ihres mangelhaften Contactes nach dem Obigen schädlich zu wirken.

Den zu messenden Widerstand legt man am besten in gabelförmige Stücke, welche innen Schneiden tragen, auf denen das zu messende Leiterstück aufliegt. Der messende Widerstand R wird am Besten aus einem Platin- oder Neusilberdraht gemacht, der auf einem Meter-Massstabe aufliegt. Den Contact vermitteln zwei Schneiden, welche auf dem Drahte aufliegen und durch Bleiklötze, an denen sie befestigt sind, an den Draht angedrückt werden. Ist der Draht durchaus gleichmässig, dass man

annehmen darf, ein bestimmtes Stück desselben schliesse auf der ganzen Länge des Drahtes hin einen gleichen Widerstand ein, so wird, wenn der Gesammtwiderstand des n Millimeter langen Drahtes gleich r, jeder Millimeter einen Widerstand von $\frac{r}{n}$ repräsentiren. Das Aichen des Drahtes nimmt man gemäss der Thomson'schen Methode selbst vor. Man legt die Contactschneiden an zwei solche Stellen des Drahtes an, dass sie 500 oder 1000 Mm. einschliessen, und macht die Verhältnisse $\frac{v_1}{v_2}$ und $\frac{v_3}{v_4}$ z. B. gleich 0.001 Zwischen den Contactgabeln schaltet man eine Widerstandsscala ein, die so lange geändert wird, bis das Galvanometer keinen Ausschlag zeigt. Ist dies für einen Widerstand w_1 der Fall, so ist der Widerstand der von den Contactschneiden eingeschlossenen 500 oder 1000 Mm. gleich einem Tausendstel w_1 und jeder Millimeter einem Fünfhunderttausendstel oder Milliontel von w_1.

Eine dritte Messbrücke rührt ebenfalls von Thomson in Gemeinschaft mit Varley her. Die folgende Darstellung derselben ist einem Aufsatze von Dr. A. Tobler in der Elektrotechn. Zeitschr. 1881, pag. 51, entnommen Die Anordnung der Brücke ist in Fig. 26 schematisch dargestellt.

x ist der unbekannte Widerstand, R der der messenden Scala W, I_x und I_R sind die Stromstärken in diesen beiden Theilen des Leiters. Die Widerstände und Stromstärken in den anderen Theilen sind in der Figur angegeben. Nach den Kirchhoff'schen Sätzen erhalten wir nun:

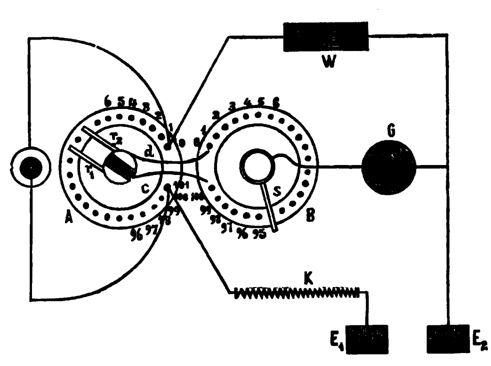
$$I_x = I_R$$

$$I_x + i_1 = I_R + i_2;\ i_4 = i_5$$
$$i_1 = i_2;\ i_2 - i_3 - i_4 = 0$$
$$i_2 = i_1 = i_3 + i_4$$

und weiter

1) $$i_1 = i_3 + i_4$$
2) $$I_R\, R - i_4\, w_4 - i_1\, w_2 = 0$$
3) $$I_R\, x - i_1\, w_1 - i_4\, w_5 = 0$$
4) $$i_4\, w_4 + i_4\, w_5 - i_3\, w_3 = 0$$

Fig. 26



Dividirt man nun Gleichung 3 durch Gleichung 2, so ergiebt sich

5) $$\frac{x}{R} = \frac{i_1\, w_1 + i_4\, w_5}{i_4\, w_4 + i_1\, w_2}$$

Man setzt nun den Werth von i_3 (aus Gleichung 1) in Gleichung 4 und berechnet daraus i_1. Wird letzterer Ausdruck in 5 substituirt, so folgt, da i_4 auf beiden Seiten fortfällt:

6) $$\frac{x}{R} = \frac{w_1 + \dfrac{w_3\, w_5}{w_3 + w_4 + w_5}}{w_2 + \dfrac{w_3\, w_4}{w_3 + w_4 + w_5}}$$

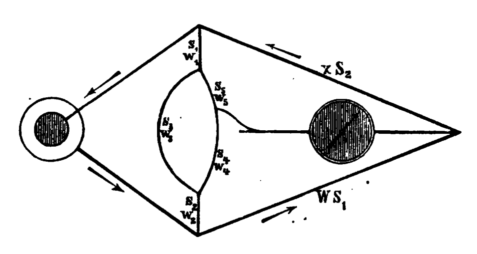
Der für diese Methode angewendete Apparat hat nun folgende Form.*) Ein länglicher Kasten enthält zwei Reihen von Widerstandsrollen; die Reihe A besteht aus 101 Rollen zu je 10, die Reihe B aus 100 Rollen zu je 0·2 Ohms. Die sämmtlichen Rollen jedes Widerstandes sind hintereinander verbunden. Von jedem Verbindungspunkte geht ein etwa 6 Mm. dicker Metallstift durch die Ebonitplatte des Kastens. Ueber die mit Platin armirten Köpfe der Stifte gleitet in der Reihe A ein doppelter, in der Reihe B ein einfacher Läufer oder Schleifcontact. Die Reihen der Contactstifte sind durch flache Messingbüchsen, die mit Glasplatten geschlossen sind, geschützt; mittelst von aussen aufzusteckender Kurbeln lassen sich die Läufer drehen. Die Arme r_1 und r_2 des Schleifcontactes in A sind, auf einer Ebonitplatte befestigt, so angeordnet, dass immer ein Contact zwischen r_1 und r_2 liegt; ferner sind die beiden Enden der Reihe B mit r_1 und r_2 in Verbindung. Da nun die zwei Rollen, welche zwischen r_1 und r_2 liegen, einen Gesammtwiderstand von 20 Ohms besitzen, die Reihe B dagegen 100 Rollen zu 0·2 Ohm enthält, so repräsentirt die (Parallel-) Schaltung einen Widerstand von $\frac{20 \times 20}{20 + 20} = 10$ Ohms. Der Widerstand der Reihe A beträgt also mit Einschluss dieser Combination blos 1000 Ohms, mit Ausschluss derselben aber 990 Ohms. Der zu messende Widerstand, sowie der eine Pol der Messbatterie, wird nun mit c, das andere

*) Die hier gegebene Figur weicht von der des Herrn Dr. Tobler etwas ab, damit die schematischen Verhältnisse, welche in der Zeichnung der angezogenen Abhandlung nicht so klar hervortreten, besser ins Auge fallen.

Ende nebst einer Widerstandsscala und der andere Pol der Batterie mit d verbunden. Zwischen dem letzteren Ende des Widerstandes und W ist das Galvanometer eingeschaltet.

Um die Uebereinstimmung des Stromlaufes mit dem Schema zu erkennen, setze man den zu messenden Widerstand x mit dem x im Schema gleich, den Rheostaten R gleich W, die geschlossene Figur $w_3\,w_4\,w_5$ gleich dem Stromkreise, welcher in Fig. 26 durch die zwei, zwischen

Fig. 26 *a*.



den Armen r_1 und r_2 des Läufers liegenden Rollen und durch die 100 Rollen in B gebildet wird. w_1 ist gleich der Anzahl der Rollen in A, die bis zu dem Contacte, auf welchem der Arm r_1 ruht, reichen, w_2 dem übrig bleibenden Widerstande von A. Hat man nun durch Verschiebung von r_1 und r_2 und s die Nadel in C zur Ruhe gebracht, so ist der in Fig. 26 das Galvanometer enthaltende Zweig stromlos. Das Verhältniss der Widerstände x und R kann dann aus den Widerständen w_1, w_2, w_3, w_4 und w_5 nach Formel 6 ermittelt werden.

Beim Gebrauche des Instrumentes sind also $r_1\,r_2$ und s einfach zu verschieben, bis G keinen Strom mehr

anzeigt; in dem Verhältniss $\frac{x}{R}$ ändert sich bei jeder Verschiebung von s der Zähler um $\frac{1}{100}$, während der Nenner um ebensoviel zunimmt.

5. Die Widerstandsscalen.

Nachdem wir im Vorigen kennen gelernt haben, wie zwei Widerstände mit einander verglichen werden können, wenden wir uns den Widerstandsscalen zu, welche dazu dienen, Widerstände von gewünschter und bekannter Grösse einzuschalten.

Die einfachste Widerstandsscala erhält man, wenn man an einem ausgespannten, möglichst gleichförmigen Drahte eine bestimmte Länge, sagen wir von n Millimetern abgrenzt und den Widerstand dieses Stückes bestimmt; jeder Millimeter des Drahtes wird dann ein n-tel dieses Widerstandes darstellen, so dass wir durch Einschaltung von der nöthigen Anzahl von Millimeter Draht ein beliebiges Vielfaches des Widerstandes eines Millimeters herstellen können. Eine Anwendung dieser Scala fanden wir schon bei der Thomson'schen Brücke.

Eine bequeme Form bietet der Wheatstone'sche Rheostat dar. Auf einer Walze von isolirendem Material, meistens Serpentin, liegt ein gleichförmiger Neusilberdraht in Schraubenwindungen so aufgewunden, dass sich die Windungen an keiner Stelle berühren. Das eine Ende dieses Schraubenganges ist isolirt, das andere steht durch die Axe der Walze mit einer Klemmschraube in Verbindung. Parallel zur Walze liegt eine metallene Stange, auf welcher

sich ein Rädchen drehen und verschieben kann. Dieses Rädchen ist am Rande eingekehlt und passt mit seiner Einkehlung auf den Schraubendraht. Wird also die Walze gedreht, so wird das Rädchen nach vorwärts oder rückwärts verschoben. Es steht durch die metallene Stange und durch Federn, welche Stange und Rädchen gegen die Walze drücken, mit einer zweiten Klemmschraube in Verbindung. Werden diese beiden Klemmschrauben mit den Polen einer Batterie verbunden, so geht der Strom von der einen Klemmschraube durch die Windungen bis an die Stelle, wo das Rädchen mit dem Schraubendrahte in Verbindung steht, von hier aus durch das Rädchen nach der anderen Klemmschraube. Kennt man nun den Widerstand des ganzen Drahtes, so lässt sich sowohl der Widerstand einer Windung als auch eines Theiles derselben berechnen, wenn man weiss, um welchen Winkel die Walze, vom Endpunkte der letzten ganzen Windung gerechnet, gedreht ist. Ist z. B. U der Gesammtwiderstand des Drahtes und sind a Windungen auf der Walze, so hat jede Windung $\frac{U}{a}$ Widerstand. Waren m ganze Windungen eingeschaltet und ausserdem noch die Walze um 5 Kreisgrade weiter gedreht, so ist der eingeschaltete Widerstand

$$\frac{U}{a}\left(m + \frac{5}{360}\right).$$

In etwas anderer Form besteht dieser Apparat aus zwei parallelen, gleich langen und dicken Walzen, die eine von Metall, die andere von Buchsbaumholz. In diese letztere ist ein Schraubengang eingeschnitten, in welchem, durch die Schraubengänge isolirt, ein Draht liegt. Das

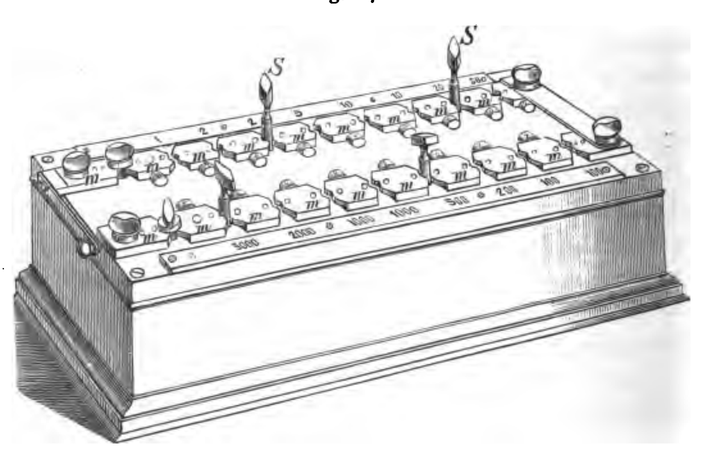
eine Ende dieses Drahtes ist an der Holzwalze befestigt und steht mit einer Klemmschraube in leitender Verbindung, das andere Ende ist an der metallenen Walze befestigt, welche mit einer zweiten Klemme leitend verbunden ist. Wird die metallene Walze gedreht, so wickelt sich der auf der isolirenden Walze liegende Draht ab und auf die metallene Walze, wodurch mehr und mehr Widerstand ausgeschaltet wird. Durch Drehung der isolirenden Walze wird der Draht auf diese gewunden und legt sich dabei in die isolirenden Schraubengänge. Man kann auf diese Weise einen beliebigen Widerstand, der zwischen Null und dem Gesammtwiderstand des Drahtes liegt, in den Stromkreis einschalten.

So bequem diese Rheostaten sind, da sie leicht zu handhaben und feine Ablesungen gestatten, so liegt doch in dem Umstande, dass der Draht nicht auf seiner ganzen Strecke einen gleichmässig vertheilten Widerstand hat, ein Grund, dieselben nicht bei genaueren Messungen zu verwenden. Man zieht es vor, beliebige Widerstände durch successive Aneinanderfügung von Widerstands-Einheiten, Vielfachen und Bruchtheilen derselben herzustellen, statt durch die allmähliche Veränderung eines Widerstandes. Diese festen Grössen werden durch den Gebrauch nicht oder doch nicht in dem Masse verändert, wie der Draht der obigen Rheostaten. Die Einrichtung dieser Scalen ist zudem eine solche, dass die einzelnen Widerstände verdeckt liegen, und ihre Ein- und Ausschaltung von aussen geschieht.

Eine solche Widerstandsscala ist in Fig. 27 dargestellt. In dem Kasten *k* befinden sich Drahtrollen, welche Widerstände von 1—5000 haben. Diese Rollen

sind an der Deckplatte von Ebonit befestigt, durch welche die Enden jeder Rolle geführt sind. Je ein Ende einer und ein Ende der folgenden Rolle führen an ein dickes Messingstück *m*, welches diese beiden Rollen leitend verbindet. Das Anfangsende der ersten und das Schlussende der letzten Rolle sind an Klemmschrauben geführt, so dass ein Strom, welcher durch die eine Klemmschraube ein-, durch

Fig. 27.



die andere austritt, die sämmtlichen Rollen nacheinander durchläuft. Die Messingstücke *m* sind von einander isolirt auf der Deckplatte befestigt; zwischen je zwei befindet sich ein schmaler Spalt. Jede Seite dieses Spaltes hat in der Mitte eine verticale, halbcylindrische Ausbohrung, in welche ein conischer Stöpsel von Messing eingesteckt werden kann; hierdurch werden die beiden Metallstücke leitend verbunden, und der zwischen den beiden Stücken liegende Widerstand ist ausgeschaltet. Durch Einstecken

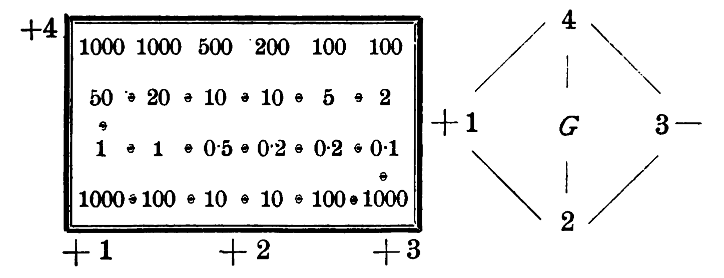
oder Herausnehmen der Stöpsel kann jeder beliebige Widerstand bis zu dem Maximum der Scala eingeschaltet werden. Sind z. B. sechszehn Drahtrollen von angegebenem Widerstande wie nachstehend angeordnet:

I. Klemme	1	2	2	5	10	10	20	50
II. Klemme	5000	2000	1000	1000	500	200	100	100

so kann man, wie man sich leicht überzeugt, jeden Widerstand von 0 bis 10.000 in ganzen Einheiten einschalten; sind noch die Zehntel 0·1, 0·2, 0·2, 0·5 angebracht, so können noch beliebige Zehntel zugefügt werden.

Bei dem Gebrauche hat man darauf zu achten, dass die Stöpsel und die Stöpsellöcher rein und gut leitend sind. Für feine Messungen führt es schon Ungenauigkeiten herbei, wenn man den Metallstift des Stöpsels mit den Fingern anfasst, wodurch er einen schwachen Fettüberzug bekommt, welcher den Widerstand vermehrt. Man beachte ferner, dass man beim Messen die Widerstände so ein- und ausschaltet, dass man von dem grösseren zum kleineren geht; Analoges gilt ja auch beim Wägen.

Mit solchen Widerstandskästen sind zuweilen Einrichtungen zum Messen von Widerständen nach der Brückenmethode verbunden, wie das folgende Schema es andeutet:



Die einzelnen Widerstände sind so gross und so angeordnet, wie es das Schema zeigt. An den Stellen, wo die Kreuze stehen, befinden sich Klemmschrauben. Legt man nun die Pole einer Batterie an die Klemmschrauben 1 und 3, einen zu bestimmenden Widerstand zwischen die Klemmschrauben 1 und 4 und die beiden Zuleitungsdrähte eines Galvanometers an 2 und 4, so bildet die Verbindung 1 2 3 den einen, die Verbindung 1 4 3 den anderen Zweig der Brücke.

Die beiden Widerstände, welche verglichen werden sollen, liegen zwischen Klemmschraube 1 und 4, resp. 3 und 4. Den beiden Theilen des ersten Zweiges kann man jedes Verhältniss, welches die Zahlen 10, 100, 1000 mit einander bilden können, geben.

Bequemer als die Widerstandskästen mit Stöpseln sind die Kurbel-Rheostaten, bei denen man durch Drehung einer Kurbel Widerstände aus- und einschalten kann. Ein solcher Rheostat ist schon bei dem Apparate der Varley'schen Brückenmethode erwähnt worden. Wir wollen an dieser Stelle etwas näher auf die Construction dieses Rheostaten eingehen.

Neun Widerstandsrollen, jede von einer Einheit, liegen in einem Kasten. Auf der Deckplatte des Kastens liegen im Kreise zehn Messingköpfe, von denen jeder mit dem Anfangsende der einen Widerstandsrolle und dem Schlussende der vorhergehenden in Verbindung steht, bis auf Kopf 0 und 9, welche nur die beiden Enden des ganzen, von allen neun Rollen gebildeten Drahtes darstellen. Mit Kopf 0 steht eine Klemmschraube in Verbindung. Auf der Deckplatte dreht sich um den Mittelpunkt des Kreises, auf dem die Köpfe stehen, eine Kurbel,

die mit einer zweiten Klemmschraube in Verbindung steht. Der Kurbelarm trägt eine Contactfeder, welche auf den mit Platin armirten Köpfen schleift und so den Contact vermittelt. Stellt man die Kurbel auf einen Kopf ein, so wird ein Strom, der durch die eine Klemmschraube ein- und durch die andere austritt, alle die Widerstandsrollen zu passiren haben, welche zwischen dem Kopf 0 und demjenigen liegen, auf welchem die Contactfeder ruht. Man kann also durch Drehung der Kurbel jeden Widerstand von 0 bis 9 zwischen die beiden Klemmschrauben bringen. Sind nun drei solche Systeme von Rollen, das eine mit Rollen von 1 Einheit, das zweite mit solchen von 10, das dritte endlich mit Rollen von 100 Einheiten aufgestellt, so können wir durch Drehungen der Kurbeln dieser drei hinter einander verbundenen Systeme rasch jeden Widerstand von 1 bis 999 Einheiten zwischen die Klemmschraube 0 des ersten Systemes und den Kurbelarm des letzten einschalten. Man ersieht leicht, wie dieser Mess-Apparat auch für Bruchtheile von Einheiten und grössere Widerstände eingerichtet werden kann. Obwohl bequemer als die Stöpselscala, hat doch der Kurbel-Rheostat den erheblichen Mangel, dass der Contact der Kurbel mit den Köpfen ein unzuverlässiger ist. Für genaue Messungen kann er daher den Widerstandskasten mit Stöpselung nicht ersetzen.

In den Fällen, wo man Widerstandsscalen von sehr hohen Widerständen bedarf, bedient man sich nicht der Widerstände von aufgewickeltem Draht, weil solche Widerstandsrollen zu unförmig werden würden, sondern zieht es vor, dergleichen Widerstände von Graphit herzustellen, der einen etwa 1000mal grösseren Widerstand hat als

das Kupfer. Dergleichen Widerstände von 100.000 bis 100 Millionen Einheiten fertigt man in der Weise an, dass man in einer Horngummiplatte Nuthen anbringt, die mit Graphit eingerieben sind. Die beiden Enden jeder Nuthe stehen mit Klemmschrauben in Verbindung. Durch stärkere Auftragung oder Entfernung des zu viel aufgeriebenen Graphitpulvers bringt man es dahin, dass jede Nuthe einen bestimmten Widerstand erhält. Eine zweite Horngummiplatte, welche auf der ersten aufliegt, schützt den Graphitüberzug gegen Aenderung durch äussere Einflüsse.

Für Widerstände, welche für starke Ströme bestimmt sind, muss auf die starke Wärme-Entwickelung, welche die Widerstände zerstören oder doch dieselben beträchtlich verändern kann, Rücksicht genommen werden. Man nimmt daher zu solchen starke Drähte und legt die Widerstände in Wasser, wodurch eine zu grosse Temperatur-Erhöhung vermieden wird. Auch fertigt man sie aus dicken Metallstangen an, in welchen sich die Wärme-Entwickelung über eine grosse Metallmasse vertheilt, und die Temperatur-Erhöhung nicht eine allzu grosse wird. — Statt metallischer Leiter bedient man sich auch zuweilen solcher von Kohle, oder, wenn der Widerstand ein ziemlich grosser sein soll, der Lösungen von Metallsalzen, in welche man zwei Elektroden eintaucht. Diese letzteren sind aber als Masse, wegen der Polarisation, nicht tauglich.

6. Die Leitungsfähigkeit.

Wie wir im Art. 1 sahen, war der Widerstand eines Leiters abhängig von seiner Länge und seinem Querschnitt. Da aber Leiter, welche zwar dieselben Dimensionen besitzen, aber aus verschiedenen Stoffen sind, sehr verschiedene Widerstände aufweisen, so muss noch ein weiterer Factor für die Bestimmung des Widerstandes angenommen werden, welcher von Stoff zu Stoff sich ändert, für ein und denselben Stoff aber constant bleibt. Diesen Factor heisst man die Leitungsfähigkeit.

Zur Ermittelung der Leitungsfähigkeit eines Stoffes bedarf es nur der Bestimmung des Widerstandes eines Leiterstückes von bekannten Dimensionen aus diesem Stoff. Ist w dieser Widerstand, l und q die Länge und der Querschnitt, so ist durch Umkehrung der Formel $w = \frac{l}{k\,q}$ des Art. 1 die Leitungsfähigkeit

$$k = \frac{l}{w\,q}.$$

Die folgende Tabelle giebt die Leitungsfähigkeiten einiger wichtigeren Stoffe.

Leitungsfähigkeit einiger Metalle in runden Zahlen, die des Quecksilbers = 1 gesetzt.

Metall	
Aluminium	33
Blei	5
Eisen	9
Gold	46
Kupfer, hart	58
Kupfer, geglüht	59

Platin	10
Quecksilber	1
Silber, hart	58
Silber, geglüht	63
Zink	17
Zinn	7
Neusilber	5
Messing	11

Wenn die Leitungsfähigkeit vorher als eine Grösse bezeichnet wurde, welche für den betreffenden Stoff eine specifische Constante sei, so muss dieser Satz in gewisser Weise eingeschränkt werden.

Zunächst verändert jede Beimischung die specifische Leitungsfähigkeit eines Stoffes, und da solche Beimischungen, zumal im praktischen Gebrauche, kaum zu vermeiden sind, so darf man die in der Tabelle angegebenen Zahlen nicht ohne weiteres auf den Stoff anwenden, für welchen sie gegeben sind. Vielmehr bieten dieselben nur einen gewissen Anhalt, während die genaue Bemessung der Leitungsfähigkeit in jedem Falle einer vorhergehenden Probemessung des zu verwendenden Stoffes bedarf.

Aber nicht nur Beimischungen fremder Stoffe verändern die Leitungsfähigkeit, sondern auch molekulare Aenderungen, z. B. der Dichtigkeit, wie solche durch Druck, Zug und Biegung entstehen, führen Aenderungen der Leitungsfähigkeit herbei.

Die wichtigste dieser Aenderungen ist die Abnahme der Leitungsfähigkeit der Metalle mit steigender Temperatur. Alle Metalle erleiden bei der Temperatur-Zunahme

eine Verminderung ihrer Leitungsfähigkeit. Diese Abnahme ist aber nicht proportional der Temperatur-Zunahme, sondern in ziemlich verwickelter, noch nicht genügend aufgeklärter Weise von derselben abhängig. Für Temperatur-Aenderungen innerhalb mässiger Grenzen hat Lenz eine Formel aufgestellt, welche den Zusammenhang zwischen Temperatur und Leitungsfähigkeit giebt. Danach ist die Leitungsfähigkeit eines Metalles für die Temperatur

$$L_t = L_0 (1 - a t + b t^2)$$

wo L_0 die Leitungsfähigkeit des in Frage stehenden Stoffes bei der Temperatur Null und t die Temperatur bezeichnet. — Die Constanten a und b sind für jedes Metall verschieden.

Für Kupfer bedient man sich in der Praxis der Formel

$$L_t = \frac{L_0}{(1 \cdot 00372)\, t}$$

Die Guttapercha, die als Isolationsmittel von Bedeutung ist, verändert ihren Widerstand mit der Temperatur in entgegengesetzter Weise; hier wächst nämlich die Leitungsfähigkeit mit steigender Temperatur, so dass die isolirende Kraft der Guttapercha bei höheren Wärmegraden geringer als bei niedrigeren ist. Die Formel, welche man empirisch für den Zusammenhang der Leitungsfähigkeit dieses Stoffes mit der Temperatur ermittelt hat, ist

$$L_1 = \frac{L_2}{1 \cdot 0574)\, t}$$

wo L_1 die Leitungsfähigkeit bei der niedrigen, L_2 diejenige der um t Grade höheren Temperatur bedeutet.

IV.

Die Messung der elektromotorischen Kraft.

1. Die elektromotorische Kraft.

Die beiden in den vorigen Artikeln behandelten elektrischen Grössen sind solche, welche bei der Bewegung der Elektricität in Leitern auftreten. Die Bewegung der Elektricität setzt aber eine Kraft voraus, welche sie in Bewegung setzt, und es drängt sich daher die Frage nach der Natur und der Grösse dieser Kraft auf. Was den ersten Theil dieser Frage anbetrifft, welche auf das Wesen der elektromotorischen, d. i. der elektricitätsbewegenden Kraft geht, so vermag die Wissenschaft nicht eine Antwort zu geben, welche mehr als eine Vermuthung oder Hypothese ist. Anders steht es mit der Messung der Grösse der elektromotorischen Kraft, die wir aus der Grösse der durch sie getrennten Elektricitäten bestimmen können.

Bevor wir weiter gehen, wird es jedoch gut sein, einige Worte über die beiden Elektricitätsarten einzuschalten, weil es manchmal zu Missverständnissen führt, wenn einmal von der Elektricität schlechthin, ein andermal von zwei Elektricitäten gesprochen wird.

Man denke sich eine Spiralfeder an ihren beiden Enden eingeklemmt, so dass diese Enden sich nicht verrücken können. Wir fassen diese Feder in der Mitte und schieben den gefassten Theil nach dem einen Ende zu. Dann befinden sich beide Hälften in Spannung, aber in Spannung verschiedener Art. — Die eine Hälfte ist zusammengedrückt und strebt sich auszudehnen; die andere hingegen ist gestreckt und will sich zusammen ziehen. Wir sehen, in beiden Federtheilen ist Kraft aufgespeichert und dennoch haben diese beiden Kraftmengen einen Unterschied, sie unterscheiden sich von einander. Die ganze Eigenthümlichkeit ihres Verhaltens besteht darin, dass sie einander entgegengesetzt sind.

Genau so ist es mit den beiden Elektricitäten, sie sind in allen Beziehungen gleich, bis auf die einzige Beziehung zu einander; hier sind sie einander entgegengesetzt.

Jede Elektricitätsmenge stellt, für sich genommen, ein gewisses Quantum aufgespeicherter Kraft dar.

Was geschieht nun, wenn wir zwei Elektricitätsmengen entgegengesetzter Art mit einander vereinigen?

Kehren wir zu unserer Feder zurück. Wir hatten in beiden Hälften Kraft aufgespeichert; nunmehr lassen wir das festgehaltene Stück fahren. Indem der Zug der einen Hälfte und der Druck der anderen sich einander unterstützen, kann die Kraft, welche dabei frei wird, eine gewisse Arbeit leisten. Wird eine solche Arbeit nicht geleistet, bliebe die frei gewordene Kraft in der Feder, so würde der vorher festgehaltene Federtheil nunmehr beständig um die Mitte oscilliren, und das giebt uns ein passendes Bild, wie bei der Vereinigung zweier Elek-

tricitäten Wärme entsteht, die ja nach unseren Anschauungen ein solches Oscilliren der Moleküle ist.

Wir wollen mit unserer Feder aber noch etwas Weiteres zeigen. Wir lassen das eine Ende der Feder fest, das andere dagegen soll verschiebbar sein. Nunmehr verschieben wir sowohl die Mitte als auch das zweite Ende, beide in derselben Richtung, jedoch um verschiedene Grössen. Jetzt sind beide Hälften der Feder im gleichen Sinne, aber in verschiedener Stärke gespannt, sagen wir zusammengedrückt.

Halten wir nun beide Enden fest, lassen aber die Mitte los, so werden sich die beiden verschiedenen Spannungen ausgleichen und es wird dabei Kraft frei werden. Dieselbe Erscheinung finden wir bei der Elektricität. Zwei Elektricitätsmengen von gleicher Art, aber verschieden grosser Spannung, suchen sich auszugleichen, indem beide einer Mittelspannung zustreben; sie verhalten sich also wie zwei entgegengesetzte Elektricitäten.

Betrachten wir eine der Elektricitäten als eine negative Grösse, so können wir die bei dem Ausgleich zweier Elektricitätsmengen frei werdende Kraft der Differenz der beiden Mengen proportional setzen.

Ist also A die Spannung der einen Elektricitätsmenge, B die der anderen, so ist die freiwerdende Kraft proportional $A - B$, oder, wenn die eine Elektricität entgegengesetzer Art ist, proportional $A - (-B) = A + B$. Umgekehrt wird ein gleiches Mass Kraft nothwendig sein, um zwei Elektricitätsmengen von dieser Differenz zu erzeugen.

Es kann daher die elektromotorische Kraft, d. h. diejenige, welche nöthig ist, um Elektricitäten verschie-

dener Art von einander zu trennen, gleich der Differenz gesetzt werden, welche die Spannungen der beiden getrennten Elektricitätsmengen erlangt haben.

Findet nun durch einen Leiter hindurch ein Ausgleich zweier verschiedener Elektricitätsmengen statt, so wird dieser Ausgleich sich nicht an einer Stelle vollziehen, sondern sich über den ganzen Leiter hin erstrecken, so dass die Spannung für die einzelnen Punkte des Leiters eine verschiedene ist und gleichmässig von einem Punkte zum andern abfällt. Die Spannungs-Differenz zweier verschiedener Punkte des Leiters kann aber gleich einer elektromotorischen Kraft gesetzt werden, bei welcher dann das Ohm'sche Gesetz

$$I = \frac{E}{W}$$

gilt, wenn E die elektromotorische Kraft, d. h. die Spannungs-Differenz, und W den Widerstand zwischen den beiden Punkten, I aber die Stromstärke bedeutet. Sind von diesen drei Grössen zwei bekannt, so kann daraus die dritte gefunden werden.

Als Einheit der elektromotorischen Kraft ist jetzt der Volt allgemein angenommen, welcher den absoluten Einheiten angehört, über welche im Anhange weiteres gesagt werden soll. Hier genüge vorderhand die Definition. dass ein Volt in einem Widerstande von einem Ohm ein Ampère ergiebt, also

$$1 \text{ Ampère} = \frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ohm}} \text{ ist.}$$

Früher bediente man sich als Einheit für die elektromotorische Kraft der Spannungs-Differenz an den Polen

eines Daniell'schen Elementes, und bezeichnete diese Grösse als Daniell.

Das als empirische Einheit der elektromotorischen Kraft verwendete Daniell'sche Element empfiehlt sich wegen seiner geringen Aenderung durch Polarisation, wenn man nur die Vorsicht beachtet, die Kupfervitriol-Lösung concentrirt zu halten. Mit der absoluten Einheit verglichen, hat das Daniell'sche Element 1·124 Volts.

Weil bei der gewöhnlichen Form des Elementes es leicht eintreten kann, dass Kupfervitriol-Lösung zum Zink diffundirt und die elektromotorische Kraft ändert, so hat Raoult ein Daniell'sches Normal-Element für elektromotorische Messungen construirt, in welchem die Zinkvitriol- und Kupfervitriol-Lösungen sich in gesonderten Gläsern befinden. Diese Gläser sind dann durch eine umgekehrte U-förmige Röhre, deren Enden mit porösen Thonplatten verschlossen, und welche mit Zinkvitriol-Lösung gefüllt ist, mit einander verbunden. In die Zinkvitriol-Lösung taucht eine amalgamirte Zink-, in die Kupfervitriol-Lösung eine Kupferplatte.

Ausser dem Kupfer hat man zu Normal-Elementen noch andere Metalle verwendet, insbesondere Silber und Quecksilber. Von den hierher gehörigen Elementen möge das Chlorsilber-Element und das Normal-Element von Clark Erwähnung finden. — Das erstere besteht aus einem grossen Reagensgläschen, auf dessen Boden ein 1—2 Cm. hoher Silbercylinder liegt. Dieser Cylinder, zu welchem ein mit Guttapercha isolirter Kupferdraht führt, ist mit frisch gefälltem Chlorsilber bedeckt, über welchem eine concentrirte Lösung von Kochsalz steht; in diese taucht der amalgamirte Zink-

stab. Elektromotorische Kraft des Elementes = 1·065 Volts = 0·944 Dan.

Clark's Normal-Element besteht aus einem etwa 2 Cm. weiten Glasgefäss, auf dessen Boden sich Quecksilber befindet. Ein in einer Glasröhre eingeschmolzener Platindraht taucht in das Quecksilber und vermittelt so die Verbindung. Ueber dem Quecksilber liegt eine mit Zinkvitriol-Lösung durchtränkte Paste von schwefelsaurem Quecksilberoxydul, in welche der Zinkstab taucht. Das Ganze ist durch einen Paraffinstöpsel luftdicht abgeschlossen. Die elektromotorische Kraft des Elementes, welches sich nur für elektrostatische Messungen eignet, ist gleich 1·456 Volts = 1·29 Dan.

2. Die Methoden zur Messung der elektromotorischen Kraft.

Für die Messung dieser elektrischen Grösse giebt es zwei verschiedene Methoden. Die erste derselben gründet sich darauf, dass zwei elektrische Körper, welche Elektricität von verschiedener Dichte haben, einen anderen beweglichen, elektrisirten Körper ungleich stark anziehen oder abstossen, so dass wir aus der Differenz dieser beiden Kräfte auf die Differenz der Dichtigkeiten schliessen können. Diese Methode ist erst in neuerer Zeit zur praktischen Anwendung für die Galvanometrie gelangt, weil die Instrumente, welche bisher zu den Messungen der, Anziehungs - Differenz dienten, nicht empfindlich genug waren, um genaue Messungen zu erlauben. Erst mit dem Quadranten-Elektrometer von Thomson ist ein Präcisions-Instrument für die Messung der Dichtigkeits-Verschiedenheit

geschaffen worden, welches für die Bestimmung dieser Grösse dieselbe Bedeutung hat, wie das Spiegel-Galvanometer für die Stromstärke-Messung. Es soll jedoch dieses Instrument und sein Gebrauch erst in dem Capitel über die Instrumente für Messung der statischen Elektricität besprochen werden.

Die zweite Methode der Messung der elektromotorischen Kraft führt auf Messung der Stromstärke zurück. Kennen wir nämlich den Widerstand W und die Stromstärke I in einem Leiterstücke, so erhalten wir mittelst der Ohm'schen Formel ohne Weiteres die elektromotorische Kraft E, welche zwischen beiden Enden des Leiters herrscht, nämlich

$$E = I\,W$$

Sehr bequem ist diese Methode bei Benutzung eines justirten Galvanometers. Um diese Justirung vorzunehmen, schaltet man in einen Stromkreis, dessen Stromstärke genau bekannt ist, und die wir gleich I setzen wollen, einen bekannten Widerstand, sagen wir von n Ohm ein. An die beiden Enden dieses Widerstandes legt man die beiden Zuleitungsdrähte eines Galvanometers, dessen Widerstand sehr gross gegen die n Ohm ist. Die elektromotorische Kraft der beiden Enden des Widerstandes wird sein

$$I\,n \text{ Volt.}$$

Aus der Ablenkung a des Galvanometers lässt sich nun leicht berechnen, wie gross die Ablenkung für 1 Volt sein würde; bei Galvanometern, bei denen die Ablenkung proportional der Stromstärke ist, wäre der Ausschlag für 1 Volt $= \frac{a}{I\,n}$. Legen wir nun ein so

justirtes Galvanometer an zwei verschiedene Stellen eines Stromkreises an, so wird die in dem Galvanometer auftretende Stromstärke proportional der elektromotorischen Kraft der beiden Stellen sein, da der Widerstand im Instrumente stets der gleiche ist. Somit wird auch bei den Instrumenten mit proportionaler Angabe der Ausschlag proportional der elektromotorischen Kraft sein. Da wir nun den Ausschlag für 1 Volt ermittelt haben, können wir auch die Spannung zwischen beiden Stellen sofort in Volt ausdrücken. War z. B. für ein bestimmtes Instrument der Ausschlag für 1 Volt = 100 Scalentheilen, so bedeutet jeder Scalentheil 0·01 Volt.

Am geeignetsten sind für eine solche Messung das Spiegel-Galvanometer und das Torsions-Galvanometer. Das Letztere ist vor Allem dazu bestimmt, Spannungen zu messen und wird demgemäss auch justirt. Vor dem Spiegel-Galvanometer, das ihm an Empfindlichkeit und Genauigkeit überlegen ist, hat es den Vorzug, dass es bequem zu transportiren und rasch zum Gebrauche aufzustellen ist.

Zur Messung der Spannung mit dem Spiegel-Galvanometer schaltet man vor dasselbe einen grossen Widerstand, so dass nur ein minimaler Theil des Stromes, an welchem die Messung vorgenommen werden soll, durch das Galvanometer geht und die Spannung an den Anlegestellen kaum verändert wird. Man legt nun die beiden Enden des Galvanometers (Fig. 28) an die Stellen *a* und *b*, deren Spannung ermittelt werden soll, und beobachtet den Ausschlag. Legt man darauf die Enden an die Pole eines Daniell'schen oder eines Normal-Elementes, — wobei, wenn nöthig, ein Nebenschluss einge-

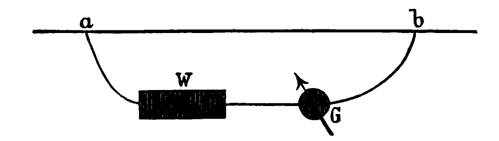
schaltet wird — so ergiebt das Verhältniss des ersten Ausschlages A zu dem zweiten D die Spannung S in Daniell, oder in der Einheit, welche das Normal-Element repräsentirt, es ist also

$$S = \frac{A}{D} \text{ Dan.},$$

ein Ausdruck, der sich dann leicht in Volts umrechnen lässt.

Die Methode der Gegenschaltung besteht darin, dass man die zwei Punkte a und b je mit zwei Punkten eines anderen Stromkreises von bekanntem Widerstande

Fig. 28.



und bekannter Stromstärke in Verbindung bringt. Es werden sich in einem solchen Stromkreise immer zwei Punkte, a_1 und b_1, finden lassen, deren Spannungs-Differenz die gleiche mit der von a und b ist; verbindet man diese Punkte a_1 mit a und b_1 mit b, so wird die leitende Verbindung a_1 a und b_1 b stromlos sein.

Die Anordnung dieses Messverfahrens ist in Fig. 29 dargestellt.

Eine Batterie wird durch die, gegen den Batterie-Widerstand sehr grossen Widerstände w_1 und w_2, die unter sich und mit der Batterie durch kurze und dicke Drähte verbunden sind, geschlossen. Von dem Punkte a_1, welcher zwischen w_1 und w_2 liegt, führt eine Verbindung, in welcher ein Galvanometer eingeschaltet ist, nach a,

desgleichen von b_1, das zwischen w_1 und der Batterie liegt, eine Leitung nach b. Die Richtung des Stromes in dem Stromkreise $a_1 b_1$ ist die gleiche mit der in $a b$.

Ist die Spannungs-Differenz gleich, so wird das Galvanometer keinen Strom anzeigen. Die Spannungs-Differenz $(a_1 b_1)$ lässt sich aber aus der elektromotorischen Kraft der Batterie und den Widerständen w_1 und w_2 ermitteln. Ist E diese elektromotorische Kraft der Batterie, so ist die Stromstärke des Stromkreises

$$I = \frac{E}{w_1 + w_2}$$

Fig. 29.

Die Stromstärke ist überall im Stromkreise gleich, sie wird also auch für ein beliebiges Stück des Stromkreises gleich der zwischen den beiden Enden dieses Stückes herrschenden Spannung, dividirt durch den Widerstand dieses Stückes sein, was für unseren Fall

$$I = \frac{e_1}{w_1}$$

ergiebt, wo e_1 die elektromotorische Kraft der beiden Punkte a_1 und b_1 und w_1 den zwischen beiden liegenden Widerstand bedeutet. Hat man also durch Regulirung der beiden Widerstände es dahin gebracht, dass die Spannungs-Differenz e zwischen a und b gleich ist e_1,

und daher der Brückenzweig $a\, a_1$ stromlos ist, so ist

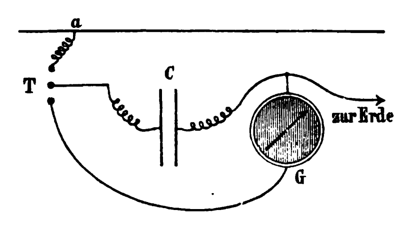
$$\frac{e}{w_1} = \frac{E}{w_1 + w_2}$$

oder

$$e = E \frac{w_1}{w_1 + w_2}.$$

Bequemer als diese Methode ist die Messung der Dichtigkeits-Differenz mittelst des Condensators. Was die Einrichtung und Theorie dieser Vorrichtung angeht, so verweisen wir auf den nächsten Abschnitt; hier genüge zu

Fig. 30.



sagen, dass ein Condensator, dessen eine Belegung mit der Erde, dessen andere mit einem elektrischen Körper verbunden ist, sich in der Zeit-Einheit proportional der elektrischen Dichtigkeit, welche an dem angelegten Punkte herrscht, ladet. Verbindet man dann nach geschehener Ladung die beiden Belegungen mit einander und durch ein Galvanometer, so wird die Ablenkung des Galvanometers proportional der Ladung sein. Um Messungen nach dieser Methode auszuführen, verbindet man die eine Belegung des Condensators C mit der Erde und mit der Zuleitung eines Galvanometers wie es Fig. 30 darstellt.

Die andere Belegung wird zunächst an den Punkt *a* angelegt und mit diesem während einer bestimmten Zeit *t* in Verbindung gelassen. Man trennt darauf die Belegung des Condensators von *a* und verbindet sie mit dem Galvanometer, durch welche die in der Belegung befindliche Elektricitätsmenge sich mit der auf der anderen Belegung gebundenen Elektricität vereinigt. Die Ablenkung des Galvanometers zeigt die Grösse der Ladung während der Zeit *t* an. Nunmehr wird die Belegung des Condensators mit dem Punkte *b* verbunden, und man verfährt in gleicher Weise, wie bei der Messung der ersten Ladung. Die Differenz der Ladungen wird proportional der Dichtigkeits-Differenz der beiden Punkte *a* und *b* sein, oder proportional der Differenz der Ausschläge des Galvanometers, wenn dessen Ausschläge proportional der Stromstärke sind. Kennt man durch vorhergegangene Bestimmung die Differenz der Ausschläge für die Dichtigkeits-Verschiedenheit in Volts, so lässt sich die elektromotorische Kraft der Punkte *a* und *b* unmittelbar in Volts ausdrücken.

3. Spannungs-Messungen zu besonderen Zwecken.

Aus dem Ohm'schen Gesetze folgt, dass man die eine elektrische Grundgrösse mittelst der beiden anderen bestimmen kann. Da nun die Verhältnisse manchmal eine directe Messung der einen Grösse nicht gestatten, so kann man diese Grösse aus Messungen der beiden anderen bestimmen. Dadurch gewinnt auch die Messung der Spannung an Bedeutung, weil mit ihr, wenn von den beiden Grössen, Widerstand und Stromstärke, nur eine bekannt ist, die andere bestimmt werden kann.

Wir wollen zuerst die Messung der Stromstärke mittelst Spannungs-Messung behandeln. Dieselben werden insbesondere in zwei Fällen nützlich sein. Ist das eine Mal der Strom so stark, dass das Einschalten eines Mess-Apparates unmöglich ist, so misst man die Spannung zwischen zwei Punkten der Leitung, zwischen denen ein genau bekannter Widerstand liegt. Das Verhältniss $\frac{\text{Spannungs-Differenz}}{\text{Widerstand}}$ giebt dann die Stromstärke.

Häufig macht die Bestimmung des Widerstandes zwischen den beiden Anlegepunkten Schwierigkeit. Um diese zu umgehen, schaltet man, wo es angeht, in die Leitung einen genau bekannten Widerstand ein, sei es eine ganze Einheit, sei es Vielfache oder Bruchtheile derselben, und nimmt die Endpunkte desselben als Anlegepunkte. Ist das nicht möglich, so muss man den Widerstand zwischen den Anlegepunkten auf anderem Wege messen oder aus den Dimensionen des Leiters und der bekannten Leitungsfähigkeit des Materials desselben berechnen. Die mittlere Leitungsfähigkeit von gutem Kupfer zu 55 (bei Quecksilber = 1) angenommen, würde 1 Mtr. Kupferdraht der bezeichneten Stärke den beistehenden Widerstand haben.

Widerstand 1 Meters Kupferdraht von angegebenem Durchmesser bei einer Leitungsfähigkeit von 55 (Quecksilber = 1).

Durchmesser in Mm.	Widerstand in Ohms
1	0·0220
2	0·0055
3	0·0025

Durchmesser in Mm.	Widerstand in Ohms
4	0·0014
5	0·0009
6	0·0006
7	0·0004
8	0·0003
9	0·00026
10	0·00022
20	0·00005
30	0·00002

In dem zweiten Falle, bei welchem die Intensität aus Spannungs-Messungen bestimmt wird, kann man deshalb in den Stromkreis kein Mess-Instrument einschalten, weil der Widerstand im Stromkreise so klein ist, dass der hinzukommende Widerstand des Mess-Instrumentes die Stromstärke zu erheblich vermindern würde. Man bestimmt daher auch hier die Spannung an zwei Punkten des Leiters und berechnet daraus und aus dem dazwischen liegenden Widerstand die Stromstärke.

Aus Spannung und Stromstärke kann der Widerstand bestimmt werden. So misst man den Widerstand im Lichtbogen einer Bogenlampe, indem man als Anlegepunkt für die Spannungs-Messung die obere und die untere Kohle wählt und die Stromstärke in bekannter Weise, etwa mittelst eines Elektro-Dynamometers für starke Ströme bestimmt. Das Verhältniss $\frac{\text{Spannungs-Differenz}}{\text{Stromstärke}}$ giebt den Widerstand an. — Auch zur Bestimmung des Widerstandes eines flüssigen Leiters kann diese Methode, jedoch nur unter der Voraussetzung benutzt

werden, dass keine Polarisation, d. h. keine durch die Zersetzung der Flüssigkeit hervorgerufene elektrische Gegenkraft vorhanden ist.

Ist die Stromstärke unbekannt, so misst man sowohl die Spannungs-Differenz zwischen den Enden des zu messenden Widerstandes, als auch die zwischen zwei anderen Punkten des Leiters, zwischen denen ein bekannter Widerstand liegt. Das Verhältniss beider Differenzen ist dann gleich dem Verhältniss der beiden Widerstände. Hatte man für den bekannten Widerstand einen Ohm gewählt, so erhält man den Widerstand unmittelbar in Ohms aus dem Verhältniss der beiden Spannungen.

V.
Die Messung der Ladungsfähigkeit.

1. Die Ladungsfähigkeit.

Nachdem wir die Messung der drei elektrischen Grundgrössen kennen gelernt haben, sind wir in den Besitz der Mittel gelangt, durch welche wir die weiteren Grössen der Elektrik messen können. Die nächste und wichtigste dieser Grössen ist die Ladungsfähigkeit oder Capacität. Wir wissen aus der Elektricitätslehre, dass ein stationärer Zustand der Elektricität erst dann eintritt, wenn das Potential oder der elektrische Druck in dem ganzen elektrisirten Leiter gleich ist. Verbinden wir nun einen isolirten leitenden Körper mit einem elektrisirten,

so wird in den ersten Körper so lange Elektricität aus dem zweiten strömen, bis der Druck in beiden Körpern gleich geworden ist.

Die Quantität Elektricität, welche zu diesem Ausgleiche nothwendig ist, wird aber von den Formen und sonstigen Verhältnissen jeder der beiden Körper abhängig sein. Es wird mit anderen Worten der elektrische Druck sich nicht nur mit der Menge der Elektricität, welche der Körper enthält, ändern, sondern auch noch von einer zweiten Grösse abhängig sein, die durch die Individualität des Körpers bestimmt wird. Wir heissen diese zweite Grösse die Ladungsfähigkeit oder Capacität.

Diese Capacität ist proportional dem Verhältniss zwischen der Quantität Elektricität Q, welche ein Körper enthält, zu dem Drucke D, welchen diese Elektricität in dem Körper hat, also gleich

$$a \frac{Q}{D}$$

wo a eine Constante bedeutet.

Die Ladungsfähigkeiten zweier Körper L und L_1 verhalten sich also wie

$$\frac{L_1}{L} = \frac{\frac{Q_1}{D_1}}{\frac{Q}{D}} = \frac{Q_1 D}{Q D_1}$$

Für den Fall, dass $D = D_1$ gemacht wird, verhalten sich L und L_1 wie die Quantitäten Q und Q_1.

Um hiernach die Capacität eines Leiters zu messen, bestimmen wir das Verhältniss der Quantitäten Elektricitäten, welche der zu messende Leiter und der Leiter, welcher als Massstab gebraucht wird, bei gleichem elek-

trischen Druck in sich aufnehmen. Ist nun die Capacität des messenden Leiters in irgend welchen Mass-Einheiten bekannt, so kann auch die Ladungsfähigkeit des zu messenden Leiters in diesen Einheiten bestimmt werden.

Als absolute Einheit (vergl. das Anhangs-Capitel) für die Ladungsfähigkeit gilt der Farad, welcher seinen Namen nach dem berühmten englischen Physiker Faraday erhalten hat. Nach der Definition, wie sie im Pariser Congresse der Elektriker 1881 angenommen ist, hat ein Körper die Ladungsfähigkeit Ein Farad, wenn die Quantität Elektricität, welche bei einem Ampère Stromstärke in einer Secunde durch den Querschnitt eines Leiters fliesst, in dem Körper einen Druck von einem Volt ausübt. Da nun aber die Ladungsfähigkeit der Körper eine verhältnissmässig kleine ist, so pflegt man in der Praxis eine Unter-Einheit zu gebrauchen, den Mikrofarad (wörtlich Kleinfarad), welcher gleich einem Milliontel eines Farad ist. Die Ladungsfähigkeit eines leitenden Körpers wird vergrössert, wenn sich in seiner Nähe ein anderer, von ihm isolirter Leiter befindet. Für eine eingehende Darstellung dieser Erscheinung müssen wir auf die Elektricitätslehre verweisen; hier genüge zu sagen, dass die Elektricität des geladenen Körpers durch Influenz Elektricität entgegengesetzter Art in dem zweiten Körper anzieht. Hierdurch wird aber der Druck in dem elektrisirten Körper vermindert, und es bedarf einer weiteren Ladung, damit der elektrische Druck dieselbe Höhe erreicht, die er bei geringerer Ladung haben würde, wenn sich nicht ein zweiter Leiter in der Nähe befände.

Von diesem Umstande macht man Gebrauch, um bequeme Ladungs-Apparate zu erhalten, welche als Mass-

stäbe für andere Leiter dienen sollen. Wegen ihrer Fähigkeit, ein grösseres Quantum Elektricität als einfache Leiter aufzunehmen, nennt man sie Condensatoren (Verdichter). Das Princip, auf dem sie beruhen, ist folgendes: Zwei ebene Platten aus leitendem Material sind durch eine isolirende Zwischenschicht von einander getrennt. Wird nun die eine Platte mit einem elektrischen Körper in Verbindung gebracht, die andere aber mit der Erde, so strömt in die erste Platte Elektricität ein, aus der zweiten aber Elektricität der gleichen Art heraus, während die ungleiche Elektricität in der zweiten Platte zurückbleibt und gebunden wird. Die erste Platte wird nun in der angegebenen Verbindung mit der zweiten Platte mehr Elektricität aufnehmen, als für sich oder auch mit der anderen Platte zusammen leitend verbunden, weil durch die Gegenwirkung der beiden entgegengesetzten Elektricitäten auf den beiden Platten der Druck zum Theil aufgehoben wird.

Die Condensatoren, welche in der Praxis in Anwendung kommen, bestehen jedoch nicht aus einem einzigen Plattenpaare, sondern aus einer Anzahl derselben, deren gleichnamige Platten leitend mit einander verbunden sind, so dass auf diese Weise die vielen kleinen Condensatoren zu einem grossen vereinigt sind.

In der Herstellung solcher Condensatoren bieten sich insofern Unterschiede, dar, als das Mittel, aus welchem die isolirende Zwischenschicht besteht, ein verschiedenes sein kann.

Von dem Material dieser Zwischenschicht hängt nämlich sowohl die Ladungsfähigkeit des Condensators, als auch seine Isolirung ab. Das nächstliegende Zwischen-

mittel ist trockene Luft, deren Anwendung aber mancherlei Unzuträglichkeiten hat.

Ein solcher Luft-Condensator besteht aus einer Reihe dünner Metallplatten, die parallel zu einander in einem isolirenden Gestell befestigt sind. Diese Platten, von denen die geraden unter einander und ebenfalls die ungeraden unter einander verbunden sind, befinden sich in einem luftdicht verschlossenen Kasten, in welchem die Luft trocken gehalten wird. Das Trocknen geschieht entweder durch Aufstellung einer Schale mit Chlorcalcium im Kasten, oder man lässt beständig einen getrockneten Luftstrom in dem Kasten circuliren.

Fig. 31.

Bequemer sind die Papier- und Glimmer-Condensatoren. Um diese anzufertigen, klebt man auf beide Seiten eines rechteckigen Papierblattes oder einer Glimmertafel kleinere Rechtecke von dünnem Stanniol, so dass ein unbelegter Rand frei bleibt. Beide Belegungen haben kurze Ansätze (*a* und *b*, Fig. 31), welche über den Rand hinausreichen, der untere Ansatz an der entgegengesetzten Seite als der obere. Zwischen je zwei solche Platten legt man noch ein unbelegtes Papier- oder Glimmerblatt von derselben Grösse wie die belegten. Man vereinigt dann in dieser Weise eine Anzahl Platten und presst sie fest zusammen. Die vorstehenden Ansätze, welche zwei Partien bilden, werden dann noch durch besondere Schrauben zusammengepresst und hierdurch die Verbindung der gleichnamigen Platten hergestellt. — Das Ganze liegt in einem Holzkasten und

ist zu weiterer Sicherung mit Paraffin vergossen. Ausserhalb sind an dem Kasten zwei Klemmschrauben angebracht, welche in leitender Verbindung mit den beiden Plattenpartien stehen. Dergleichen Condensatoren werden auch wohl zu mehreren in einem Kasten vereinigt, und kann dann, ähnlich wie bei den Widerstandskästen die Widerstände, eine beliebige Anzahl derselben zu einem Condensator vereinigt werden, indem man sie durch Stöpsel aus- und einschaltet.

Die Glimmer-Condensatoren sind die besseren von beiden, können aber nicht für grössere Capacitäten angefertigt werden, weil der Glimmer nur kleinere Zwischenplatten etwa bis zu 10 Cm. im Quadrat hergiebt. Papier hat den Fehler, dass es nicht gut isolirt, kann aber, wo es sich um Herstellung grosser Condensatoren handelt, füglich nicht entbehrt werden. Für Condensatoren mit einer Ladungsfähigkeit über 1 Mikrofarad nimmt man daher Papier als isolirendes Zwischenmittel.

2. Die Methoden zur Messung der Ladungsfähigkeit.

Die Messung der Ladungsfähigkeit ist entweder die directe Bestimmung des Verhältnisses zwischen der Menge der in einem Körper enthaltenen Elektricität zu dem Druck, den sie ausübt, oder sie besteht in einem Vergleich mit der bekannten Ladungsfähigkeit eines anderen Körpers, eines Condensators meistentheils.

Die directe Bestimmung der Ladungsfähigkeit gründet sich darauf, dass bei Entladung die Unterschiede der Logarithmen der Entladungs-Stromstärke proportional den Entladungszeiten sind, was auch so

ausgedrückt werden kann: Für gleiche Zeitabschnitte ist der Unterschied der Logarithmen der Entladungs-Intensität (das logarithmische Decrement, d. i. Abnahme) gleich. Dieses logarithmische Decrement ist proportional der Zeit, für welche es genommen und der Dichtigkeit der Ladung, und umgekehrt proportional dem Widerstande, durch welchen die Entladung erfolgt, und der Quantität der sich entladenden Elektricität. Waren D und Q die Anfangswerthe der Dichtigkeit und Quantität, so ist das logarithmische Decrement für den ersten und damit für alle Zeittheile t

$$d = \frac{t\,D}{Q\,W}$$

und somit die Capacität des zu messenden Leiters

$$C = \frac{Q}{D} = \frac{t}{d\,W}$$

Ist t in Secunden und W in Ohms gegeben, so werden wir für C das absolute Mass (Farads) erhalten.

Um hiernach die Ladungsfähigkeit zum Beispiele eines Condensators zu bestimmen, ladet man den Condensator, verbindet die eine Belegung desselben direct mit der Erde, die andere durch einen grossen Widerstand von 100—200 Mill. Ohm und durch ein empfindliches Spiegel-Galvanometer gleichfalls mit der Erde. Man bestimmt nun aus Beobachtungen in gleichen Intervallen das logarithmische Decrement der Intensität. Sind sämmtliche Grössen in absolutem Masse gegeben, so ist die Capacität

$$C = \frac{1}{d\,W} \text{ Farad,}$$

wo W den Widerstand und d das logarithmische Decrement für eine Secunde bezeichnet.

Ist einmal auf diese Weise ein Condensator bestimmt, so kann er durch Vergleichung als Massstab für die Ladungsfähigkeit anderer Leiter dienen.

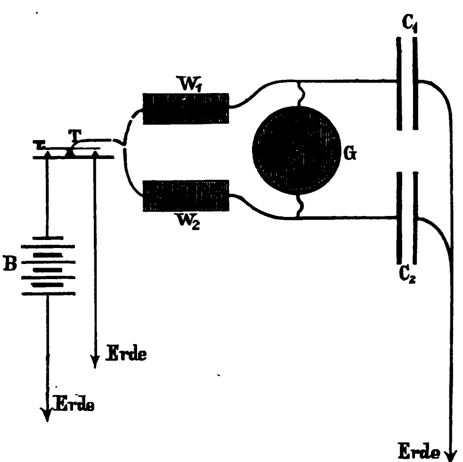
Die einfachste dieser Vergleichungs-Methoden besteht darin, dass man die eine Belegung des Condensators mit der Erde verbindet, »an Erde legt«, wie der terminus technicus lautet, und die andere Belegung für einen bestimmten Zeitraum mit dem einen Pol einer constanten Batterie in Verbindung bringt, während der andere Pol der Batterie an Erde liegt. Nach Verlauf des gewählten Zeitraumes wird die Belegung des Condensators von dem Batteriepol getrennt und durch ein Spiegel-Galvanometer zur Erde entladen. In gleicher Weise verfährt man mit dem zu messenden Leiter, der, selbstverständlich möglichst gut isolirt, während der bestimmten Zeit mit dem Pole der Batterie in Verbindung bleibt und dann ebenfalls durch das Galvanometer zur Erde entladen wird. Das Verhältniss der beiden beobachteten Ablenkungen giebt alsdann das Verhältniss der beiden Capacitäten, aus welchen also mittelst der bekannten Capacität des Condensators die Capacität des zu messenden Leiters bestimmt werden kann.

Da diese Methode aber von der Constanz der Batterie und der präcisen Einhaltung der Ladungsdauer abhängig ist, so zieht man für feinere Messungen Methoden vor, bei welchen Entladung beider zu vergleichenden Leiter gleichzeitig erfolgt.

Die erste dieser Methoden ist die Brücken-Methode von de Sauty. (Fig. 32.) Die eine Belegung des Mess-

Condensators C_1 ist mit der Erde verbunden, die andere durch den Widerstand w_1 mit dem Schlüssel s, der den Condensator mit dem Pol einer Batterie oder mit der Erde verbinden kann. Der zu messende Leiter ist ebenfalls durch einen Widerstand, w_2, mit dem Schlüssel verbunden; ist es auch ein Condensator, so wird die eine

Fig. 32.



seiner Belegungen gleichfalls zur Erde abgeleitet. Zwischen C_1 und C_2 ist, vor den Widerständen, ein Galvanometer eingeschaltet, wie aus dem Schema ersichtlich.

Verbindet man nun durch den Schlüssel die beiden Leiter C_1 und C_2 mit dem einen Pol der Batterie, während der andere Pol an der Erde liegt, so strömt in beide Elektricität ein, die zum Theil ihren Weg durch den Brückenzweig mit dem Galvanometer nehmen wird. Isolirt man darauf beide Leiter, bis die Spannung in beiden

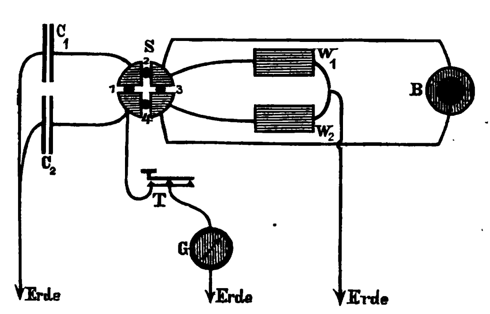
gleich geworden ist, was man aus dem Zurückgehen der Nadel des Galvanometers in die Ruhelage ersieht, und verbindet dann die Belegung durch den Schlüssel mit der Erde, so werden aus beiden Leitern die Elektricitäten abströmen. Soll nun die Spannung in beiden stets gleich bleiben, so muss jeder Leiter in derselben Zeit eine Quantität Elektricität abgeben, die seiner Capacität proportional ist. Die in derselben Zeit abgegebenen Quantitäten werden aber den Widerständen w_1 und w_2 umgekehrt proportional sein, wenn jeder Leiter sich nur durch seinen zugehörigen Widerstand entladet und keinen Zweigstrom durch den Brückendraht schickt. Reguliren wir also die beiden Widerstände derart, dass aus beiden Leitern den Capacitäten proportionale Mengen Elektricität abfliessen, so wird die Spannung in beiden stets gleich bleiben, es wird keine Spannungs-Verschiedenheit zwischen den beiden Condensatoren und darum auch kein Strom in dem Brückenzweige entstehen können. Der Stillstand der Nadel des Galvanometers zeigt also an, ob die beiden Widerstände das verlangte Verhältniss haben. Dieses Verhältniss ist aber nach dem Obigen das umgekehrte Verhältniss der Capacitäten.

Bei der Compensations-Methode werden die beiden zu vergleichenden Condensatoren etc. mit entgegengesetzten Elektricitäten von verschiedener Dichtigkeit eine gleiche Zeit lang geladen. Isolirt man sie darauf von ihren Elektricitätsquellen und verbindet sie untereinander, so werden die Elektricitäten sich ganz oder theilweise neutralisiren. Waren nun die Dichtigkeiten der Elektricitätsquellen so gewählt, dass beide Condensatoren gleiche Mengen Elektricität erhielten, so wird nach Ver

bindung der beiden Condensatoren keine freie Elektricität in ihnen vorhanden sein, es wird also auch kein Strom stattfinden, wenn wir die beiden Condensatoren nunmehr nach der Erde hin ableiten.

Um nach dieser Methode Capacitäten zu messen, schliesse man die Batterie B durch die beiden variablen Widerstände w_1 und w_2. Von dem Verbindungsdrahte der beiden Widerstände führt eine Leitung zur Erde hin, so dass also an diesem Punkte die Dichtigkeit gleich

Fig. 33.



Null sein wird. Die Dichtigkeiten an den Punkten vor den Widerständen werden sich dann wie die beiden Widerstände verhalten. Diese beiden Punkte stehen, wie aus Fig. 33 erhellt, mit zwei Metallstücken eines Umschalters in Verbindung, während mit den beiden anderen Metallstücken desselben die beiden Condensatoren verbunden sind. Die zweiten Belegungen der Condensatoren sind zur Erde abgeleitet.

Stöpselt man an dem Umschalter die Löcher 2 und 4, so laden sich die Condensatoren. Werden alsdann diese Verbindungen nach einer gewissen Zeit aufgehoben und

durch Stöpselung von 1 die beiden Condensatoren miteinander verbunden, so gleichen sich die entgegengesetzten Elektricitäten derselben entsprechend ihrem Verhältnisse aus. Nunmehr verbindet man die Condensatoren durch einen Druck auf den Schlüssel T durch das Galvanometer mit der Erde. War der Ausgleich kein vollkommener, so wird sich dieses durch den Ausschlag in G verrathen.

Durch Regulirung der Widerstände w_1 und w_2 haben wir es in der Hand, die Dichtigkeiten an den Anlegepunkten so zu ändern, dass die Ladungen der beiden Condensatoren einander gleich werden und die Compensation eine vollkommene wird, das Galvanometer also keinen Ausschlag anzeigt. Die Capacitäten der beiden Condensatoren werden sich dann umgekehrt wie die Widerstände w_1 und w_2 verhalten

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{w_2}{w_1}.$$

VI.

Die Constanten der galvanischen Batterie.

1. Der Widerstand einer Batterie.

Für die richtige Anwendung einer Batterie, welche je nach den verschiedenen Umständen eine andere Anordnung der Elemente erheischt, ist es nothwendig, den Widerstand der einzelnen Elemente zu kennen. Es ist nämlich für die beste Ausnutzung der Kraft einer Batterie von wesentlicher Bedeutung, welchen Widerstand sie in

der Leitung zu überwinden hat. Nach dem Ohm'schen Gesetze ist die Intensität von n Elementen gleich

$$\frac{E}{w + W}$$

wenn E die elektromotorische Kraft der Batterie, w den Widerstand in der Batterie und W den Widerstand ausserhalb derselben bedeutet. Ist nun e die elektromotorische Kraft eines Elementes, so werden n Elemente die elektromotorische Kraft e oder $n\,e$ haben, je nachdem sie nebeneinander oder hintereinander geschaltet sind. Der Widerstand dieser n Elemente wird aber nur der n-te Theil von dem Widerstande v eines Elementes sein, wenn die Elemente nebeneinander geschaltet sind, weil die n Elemente jetzt ein einziges Element mit der n-fachen Oberfläche darstellen. Hingegen wird er das n-fache sein, wenn die Elemente hintereinander geschaltet sind. Für nebeneinander geschaltete Elemente erhalten wir also die Stromstärke

$$\frac{e}{\frac{v}{n} + W} = \frac{n\,e}{v + n\,W}$$

für hintereinander geschaltete

$$\frac{n\,e}{n\,v + W}$$

wenn e die elektromotorische Kraft, v den Widerstand eines einzelnen Elementes bedeutet, und W der äussere Widerstand des Stromkreises ist.

Ist nun W gross gegen den inneren Widerstand eines einzelnen Elementes, so würde bei nebeneinander geschalteten Elementen nur wenig durch Vermehrung der Zahl der Elemente gewonnen. Denn wie aus der Formel

$$I = \frac{e}{\frac{v}{n} + W}$$

zu ersehen ist, würde dadurch zwar das Glied $\frac{v}{n}$ kleiner und somit I grösser werden. Da aber v nur klein gegen W ist, würde dieser Zuwachs wenig bedeuten. Schalten wir aber die Elemente hintereinander, so wird

$$I = \frac{n\,e}{n\,v + W}.$$

Der Zähler dieses Bruches wächst mit jedem neuen Elemente; der Nenner zwar auch, doch in weit geringerem Masse, da v und somit auch $n\,v$ nur klein gegen W ist.

Liegt die Sache aber anders, ist W nur klein gegen v, so wächst die Stromstärke bei nebeneinander geschalteten Elementen mit jedem neuen Elemente erheblich, während sie bei hintereinander geschalteten nur wenig zunimmt, wie man nach dem Gesagten leicht herausfinden wird.

Alles das führt uns zu der Frage: wie muss man bei einem gegebenen äusseren Widerstande W eine Batterie schalten, um das Maximum ihrer Leistungsfähigkeit zu erhalten? Wir nehmen an, dass dieses Maximum erreicht wird, wenn wir je x Elemente nebeneinander und die so erhaltenen Gruppen hintereinander verbinden. Jede Gruppe hat dann die elektromotorische Kraft e und den Widerstand $\frac{v}{x}$, wo die Buchstaben die gleiche Bedeutung wie früher haben. Ist dann n die Anzahl der Elemente, so wird die Zahl der hintereinander zu schaltenden Gruppen $\frac{n}{x}$ sein.

Die elektromotorische Kraft dieser Gruppen wird sein

$$\frac{n}{x} e,$$

der Widerstand derselben

$$\frac{n}{x} \cdot \frac{v}{x} = \frac{n}{x^2} v.$$

Ist W der äussere Widerstand, so wird die Stromstärke der so verbundenen Batterie sein

$$I_x = \frac{\frac{n}{x} e}{\frac{n}{x^2} v + W} = \frac{n x e}{n v + x^2 W}.$$

Soll diese Stromstärke das erreichbare Maximum sein, so wird jede andere Gruppirung, z. B. bei Nebeneinanderschaltung von y Elementen eine geringere Stromstärke geben. Diese zweite Stromstärke wird aber gleich

$$I_y = \frac{n y e}{n v + y^2 W}$$

sein. Sie ist kleiner als I_x und somit der Ausdruck

$$\frac{n x e}{n v + x^2 W} - \frac{n y e}{n v + y^2 W}$$

immer positiv. Bringen wir diesen Ausdruck auf den gleichen Nenner, so erhalten wir

$$\frac{n^2 v x e + n x e y^2 W - n^2 v y e - n y e x^2 W}{(n v + x^2 W) \; (n v + y^2 W)}$$

$$= n e (x - y) \frac{n v - x y W}{(n v + x^2 W) \; (n v + y^2 W)}$$

$(x - y)$ ändert aber sein Vorzeichen, wenn y grösser als x wird, somit muss auch der andere Factor des Ausdruckes sein Vorzeichen ändern, wenn die Differenz

$I_x - I_y$ positiv bleiben soll. Der Nenner bleibt immer positiv, der Zähler

$$n v - x y W$$

wird aber für den gedachten Fall negativ werden, wenn

$$n v = x x W$$

ist, oder wenn

$$x = \sqrt{\frac{n v}{W}}$$

und dieser Ausdruck giebt alsdann die Zahl der zu einer Gruppe zu verbindenden Elemente an.

Um nur den Widerstand eines Elementes zu bestimmen, sind eine Reihe von Methoden erfunden worden, von denen die hauptsächlichsten im Folgenden dargestellt werden sollen. Die Messung eines solchen Widerstandes unterscheidet sich erheblich von den früher dargestellten Widerstands-Messungen, die auf der Messung der Aenderung der Stromstärke bei Einschaltung des zu messenden Leiters beruhten. Derartige Methoden sind bei galvanischen Elementen zwar möglich; da aber die Intensität nicht nur durch den Widerstand des zu messenden Elementes, sondern auch durch den Strom, welchen das Element erzeugt, geändert wird, so bleibt man stets im Zweifel, wie viel von der Aenderung der Stromstärke auf den Widerstand des Elementes und wie viel auf seine elektromotorische Kraft zu vertheilen ist. Statt dessen bedient man sich des Stromes des Elementes selbst und bemisst aus den Aenderungen, welche er bei Einschaltung äusserer Widerstände erleidet, den inneren Widerstand.

Die einfachste dieser Methoden besteht darin, dass man das Element durch ein Galvanometer mit sehr

geringem Widerstand, der gegen den des Elementes vernachlässigt werden kann, schliesst. Die Zuleitungen sind möglichst kurze und dicke Drähte, deren Widerstand nicht in Anrechnung gebracht werden muss. Nachdem man die Stromstärke bestimmt hat, schaltet man so viel Widerstand in die Leitung ein, dass das Galvanometer nur noch die halbe Stromstärke anzeigt. Alsdann ist der Widerstand der Batterie gleich dem eingeschalteten Widerstande. Denn ist I die Stromstärke des Elementes, wenn es, wie anfangs, kurz geschlossen ist, E seine elektromotorische Kraft, w sein Widerstand, so ist

$$I = \frac{E}{w}$$

wird nun noch ein Widerstand W eingeschaltet, welcher die Stromstärke auf die Hälfte verringert, so ist

$$\frac{1}{2}\,\frac{E}{w} = \frac{E}{w + W}; \quad 2w = w + W.$$

$$w = W.$$

Eine verwandte Methode beruht auf der Messung der Spannung an den Polen, bei offener und geschlossener Kette. Ist das Element nicht geschlossen, so wird die elektrische Dichtigkeit von der Stelle an, wo die Trennung der Elektricitäten stattfindet, bis zu den isolirten Polen gleich sein. Die Differenz der Dichtigkeiten beider Hälften wird gleich der elektromotorischen Kraft E des Elementes sein.

Anders dagegen, wenn das Element geschlossen wird. Alsdann nimmt die Dichtigkeit von der Scheidungsfläche an, wo die Trennung der Elektricitäten stattfindet, stetig ab, und die Spannung zwischen zwei Punkten wird sich zur elektromotorischen Kraft des Elementes

verhalten, wie der zwischen den beiden Punkten liegende Widerstand w zu dem Gesammtwiderstand W des ganzen Stromkreises. Ist nun die Spannung an den beiden Polen bei geschlossener Kette die Hälfte von der bei offener, so muss sich der zwischen beiden Polen liegende Widerstand zu dem Gesammtwiderstand verhalten wie 1 : 2. Der Gesammtwiderstand ist aber die Summe des Widerstandes w zwischen den beiden Polen und des Widerstandes w_1 der Batterie. Es ist somit

$$\frac{w}{w + w_1} = \frac{1}{2}; \quad w = w_1$$

Um nach dieser Methode zu verfahren, schliesst man das Element, dessen Widerstand bestimmt werden soll, durch einen sehr grossen Widerstand und ein empfindliches Galvanometer.*) Alsdann darf man die Spannung an den Polen als gleich mit der an der Scheidefläche annehmen. Darauf wird das Element durch eine Zweigleitung geschlossen, deren Widerstand variabel ist. Der Strom wird jetzt durch die Zweigleitung und durch das Element circuliren, die Spannung an den Polen aber entsprechend abnehmen. Ist der Widerstand der Zweigleitung gleich dem der Batterie, so wird die Spannung an den Polen auf die Hälfte sinken. Demgemäss wird auch das schwache Strömchen, das durch den grossen Widerstand und durch das Galvanometer geht, in seiner Stärke auf die Hälfte sinken. Verändern wir also den Widerstand der Zweigleitung so lange, bis das Galvanometer nur noch die Hälfte der ersten Stromstärke anzeigt,

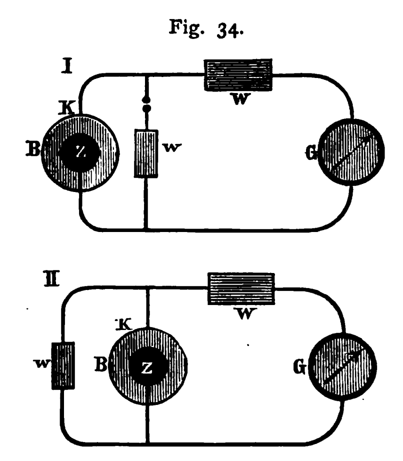
---

*) Vergl. die Methode der Messung der elektromotorischen Kraft auf S. 121.

so wird der eingeschaltete Widerstand gleich dem der Batterie sein. Fig. 34 I.

Fig. 34 II giebt die Anordnung einer Methode von Jacobi. Der Batteriestrom wird in zwei Zweige zerlegt, von denen der eine durch einen Rheostaten mit dem Widerstande w, der andere durch einen solchen vom Widerstande W und ein Galvanometer G geleitet wird.

Fig. 34.



Alsdann ist die Intensität des Hauptstromes, wenn B den Widerstand des Elementes bedeutet,

$$I = \frac{E}{B + \frac{w\,(W + G)}{w + W + G}}$$

Die Stromstärke in dem Galvanometer-Zweige wird alsdann

$$i = \frac{w}{w + W + G} \quad \frac{E}{B + \frac{w\,(W + G)}{w + W + G}}$$

$$= \frac{w E}{B(w + W + G) + w(W + G)}$$

Verändert man nun W um A, so wird auch w verändert werden müssen, damit i nicht geändert wird. Diese Aenderung von w sei a: alsdann ist

$$i = \frac{w E}{B(w + W + G) + w(W + G)}$$

$$= \frac{(w + a) E}{B(w + W + G + a + A) + (w + a)(W + G + A)}$$

und hieraus

$$B = \frac{w A (w + a)}{a (W + G) - w A}$$

Einfacher gestaltet sich der Ausdruck, wenn wir G vernachlässigen können und ferner $a = w$ nehmen, denn alsdann ist

$$B = \frac{2 w A}{W - A.}$$

Das dritte Schema der Fig. 34 zeigt eine verwandte Methode.

Das Element wird durch zwei Rheostaten W und w geschlossen und an die beiden Enden des Rheostaten w ein Galvanometer angelegt, dessen Widerstand sehr gross gegen w ist. Man liest nun die Ablenkung ab, welche das Galvanometer anzeigt, und vergrössert alsdann den Widerstand W um A. Dadurch wird die Spannung an den Enden von w kleiner, man muss daher w um a vergrössern, um die frühere Spannungs-Differenz und die frühere Ablenkung des Galvanometers zu erhalten.

Bei gleicher elektromotorischer Kraft des Elementes werden sich die Spannungs-Differenzen an den Enden eines Widerstandes verhalten, wie der Widerstand zu

dem Gesammtwiderstand. Wenn man nun nach dem Gesagten die Spannungs-Differenzen in den beiden Fällen gleich macht, so wird man erhalten

$$\frac{w}{W+w+B} = \frac{w+a}{W+w+B+A+a}$$

woraus folgt

$$B = \frac{wA - Wa}{a}$$

Noch einfacher wird die Formel, wenn man die erste Aenderung nicht an W, sondern an w vornimmt, indem man diesen Widerstand verdoppelt und darauf die zugehörige Vergrösserung A von W sucht. Alsdann ist $w = a$, und somit

$$B = A - W$$

Nr. IV der Fig. 34 ist das Schema der Umschaltungs-Methode. — Nach dieser werden durch Umschaltung an dem Stöpsel-Umschalter zwei Elemente, einmal neben einander, einmal hinter einander geschaltet. Ist dann bei gleicher Ablenkung des Galvanometers der Widerstand des eingeschalteten Rheostaten r_1 im ersten Falle, und r_2 im zweiten, so ist die Stromstärke

$$I = \frac{E}{r_1 + \frac{w}{2} + g} = \frac{2E}{r_2 + 2w + g}$$

wo g den Widerstand des Galvanometers bedeutet. Es ergiebt sich daraus

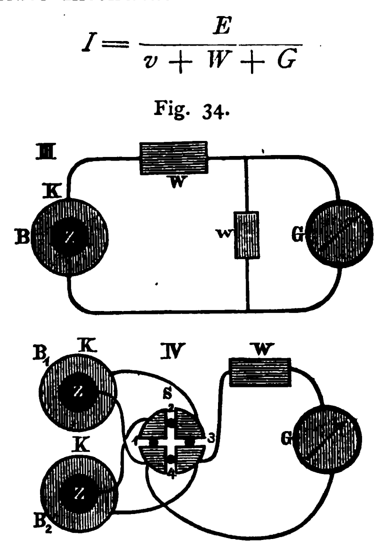
$$w = 2r_1 + g - r_2.$$

Thomson schliesst das Element erst durch einen Rheostaten W und ein Galvanometer (Fig. 34 I) und beobachtet die Ablenkung. Darauf schaltet er den Nebenschluss w ein, wodurch die Stromstärke in dem anderen

Zweige sinkt. Durch Verminderung des Widerstandes W auf W_1 wird alsdann das Galvanometer in die frühere Lage zurückgebracht. War v der Widerstand des Elementes, W der des Rheostaten und G der des Galvanometers, so war die erste Intensität

$$I = \frac{E}{v + W + G}$$

Fig. 34.



Nach Einschaltung des Zweigwiderstandes wird die Intensität

$$\frac{E}{v + \frac{(W_1 + G)\,w}{W_1 + G + w}}$$

und diejenige des Theilstromes im Galvanometer-Zweige

$$\frac{w}{(W_1 + G + w)} \; \frac{E}{v + \frac{(W_1 + G)\,w}{W_1 + G + w}} = \frac{E}{v + W + G}$$

Hieraus ergiebt sich

$$v = w\,\frac{W - W_1}{W_1 + G}.$$

Man kann auch den Widerstand von Batterien nach den gewöhnlichen Methoden bestimmen, bedarf aber dazu einer starken Messbatterie; die Elemente der zu messenden Batterie werden dabei paarweise gegen einander geschaltet.

2. Die elektromotorische Kraft eines Elementes.

Die elektromotorische Kraft eines Elementes wird gewöhnlich so bestimmt, dass man das Element mit einem anderen Elemente, dessen elektromotorische Kraft als Einheit angenommen wird, vergleicht, weil eine directe Messung der elektromotorischen Kraft, deren Einheit gemäss dem Ohm'schen Gesetze dem Producte der Widerstands- und der Stromstärke-Einheit ist, für die Praxis zu unbequem sein würde. Will man jedoch die directe Messung anwenden, so braucht man nur in den Stromkreis des Elementes oder einer Anzahl gleicher Elemente ein Silber- oder Kupfer-Voltameter einzuschalten und aus dem Gewichte des in der Zeit-Einheit niedergeschlagenen Metalles die Stromstärke zu berechnen. Hieraus und aus dem bekannten Widerstande des Stromkreises erhält man die elektromotorische Kraft des Elementes, vorausgesetzt, dass dieses während der Dauer des Versuches constant blieb und sich nicht durch Polarisation änderte. Bequemer wird diese Methode durch Anwendung eines Galvanometers, dessen Reductionsfactor*) bekannt ist. Man schaltet mit dem Galvanometer

*) Unter Reductionsfactor versteht man die individuelle Constante jedes Galvanometers, welche die Messung des Galvanometers auf

einen Rheostaten in den Stromkreis ein. Es ist dann $E = I \cdot W$, und wenn man mittelst des Rheostaten noch einen weiteren Widerstand w einschaltet, welcher die Stromstärke von I auf I_1 vermindert

$$E = I_1 (W + w)$$

Hieraus folgt

$$E = w \frac{I \cdot I_1}{I - I_1}$$

Die einfachste Methode, zwei Elemente in Bezug auf ihre elektromotorische Kraft mit einander zu vergleichen, besteht darin, dass man die beiden Elemente erst hintereinander, dann gegeneinander schaltet und die jedesmalige Stromstärke misst. Bei der ersten Schaltungsweise wird die Stromstärke

$$I = \frac{E + E_1}{W}$$

sein, wo E und E_1 die beiden zu vergleichenden elektromotorischen Kräfte sind. Bei der Gegenschaltung wird $I_1 = \frac{E - E_1}{W}$; wir erhalten somit

$$\frac{E + E_1}{E - E_1} = \frac{I}{I_1} \text{ oder } \frac{E}{E_1} = \frac{I + I_1}{I - I_1}.$$

Verwandt mit der vorigen Methode ist die Bestimmung des Verhältnisses der elektromotorischen Kräfte aus den Aenderungen der Widerstände. Man schaltet das Galvanometer und einen Rheostaten im Stromkreis des ersten

---

chemisches oder absolutes Mass zurückführt. Ist z. B. die Stromstärke I in absolutem Masse gegeben, so wird der Ausschlag eines Spiegel-Galvanometers proportional I sein, also $A = R\,I$. Kennen wir den Reductionsfactor R, so haben wir den Ausschlag A nur durch R zu dividiren, um die Stromstärke in absolutem Masse zu erhalten.

Elementes ein und vermehrt darauf den Widerstand des Stromkreises um w. Waren I und I_1 die beiden Stromstärken vor und nach Einschaltung von w, so ist

$$I = \frac{E}{W} \quad I_1 = \frac{E}{W + w}$$

Man ersetzt darauf das erste Element durch das zweite und bringt durch Aenderung des Widerstandes die Stromstärke auf I und darauf durch erneute Aenderung um v auf I_1.

Dann ist, wenn W_1 den Widerstand für die Stromstärke I bedeutet und E_1 die elektromotorische Kraft des zweiten Elementes

$$I = \frac{E_1}{W_1} \quad I_1 = \frac{E_1}{W_1 + v}$$

Nach dem Früheren ergiebt sich dann

$$E = w \frac{I\,I_1}{I - I_1} \text{ und } E_1 = v \frac{I\,I_1}{I - I_1}$$

oder

$$\frac{E}{E_1} = \frac{w}{v}$$

Bequemer als alle diese Methoden ist die Compensations-Methode, welche zuerst von Poggendorff angewandt wurde. Die beiden mit einander zu vergleichenden Elemente werden, wie aus der schematischen Zeichnung Fig. 35 zu ersehen ist, gegen einander geschaltet. In der Verbindung des einen der beiden Polpaare ist ein Galvanometer, in der des anderen ein Rheostat W eingeschaltet. Zwischen beiden Verbindungen liegt eine Brücke mit einem Rheostaten w.

Bezeichnet nun i_1 die Stromstärke in dem Zweige $E_1\ a\ b\ E_1$ und w_1 den Widerstand derselben, ferner i_2

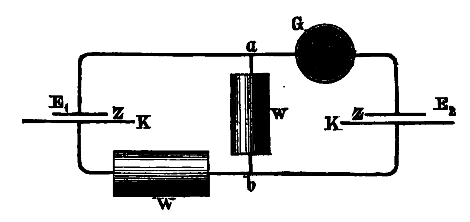
und w_2 Stromstärke und Widerstand in dem Zweige $E_2\ a\ b\ E_2$, endlich w und i Stromstärke und Widerstand in der Brücke, so ist nach den Kirchhoff'schen Sätzen

$$E_1 = i_1\, w_1 + i\, w$$
$$E_2 = i_2\, w_2 + i\, w$$

Wird durch Aenderung des Widerstandes w_1 die Stromstärke im Zweige $E_2\ a\ b\ E_2$ auf Null gebracht, so ist, da alsdann $i = i_1$,

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{w}{w_1 + w}$$

Fig. 35.



Aendert man nun den Widerstand w_1 mittelst des Rheostaten W um v_1, so bedarf es auch einer Aenderung des Widerstandes w, welche v betragen mag. — Dann ist

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{w + v}{w_1 + v_1 + w + v}$$

oder

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{v}{v + v_1}$$

Man hat daher bei dieser Messungsweise nur durch Regulirung der beiden Widerstände das Galvanometer in die Ruhelage zurückzuführen, alsdann den Rheostaten W um einen beliebigen Widerstand v_1 zu ändern und die

Aenderung v des Widerstandes von w zu bestimmen, welcher das Galvanometer aufs Neue in die Ruhelage zurückführt.

Handelt es sich darum, elektromotorische Kräfte von grosser Verschiedenheit mit einander zu vergleichen, so empfiehlt sich die Methode von Hoorweg, deren Schema in Fig. 36 gegeben ist. Die beiden zu vergleichenden Elemente sind hier hintereinander geschaltet.

Es sei nun in den Zweigen

	$a\,E_1\,c$	ab	bc	bd	cd	$d\,E_2\,a$
die Stromstärke . . .	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6
und der Widerstand .	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6

Dann ist nach den Kirchhoff'schen Sätzen

$$i_1 - i_3 - i_5 = 0$$
$$i_1 - i_2 - i_6 = 0$$
$$i_2 - i_3 - i_4 = 0$$
$$i_4 - i_5 - i_6 = 0$$
$$i_1 w_1 + i_2 w_2 + i_3 w_3 = E_1$$
$$i_6 w_6 - i_2 w_2 - i_4 w_4 = E_2$$
$$i_3 w_3 - i_5 w_5 - i_4 w_4 = 0$$
$$i_1 w_1 + i_5 w_5 + i_6 w_6 = E_1 + E_2$$

Für $i_4 = 0$ ist alsdann

$$i_2 = i_3 \quad i_5 = i_6 \quad i_3 = i_5 \frac{w_5}{w_3}$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{i_5 w_6 - i_3 w_2}{w_1 (i_3 + i_5) + i_3 w_2 + i_3 w_3}$$
$$= \frac{w_3 w_6 - w_2 w_5}{(w_1 + w_2 + w_3) w_5 + w_1 w_2}$$

Wird nun w_1 um a vermehrt, und darauf w_6 um b, bis wiederum $i_4 = 0$ ist, so wird die obige Gleichung

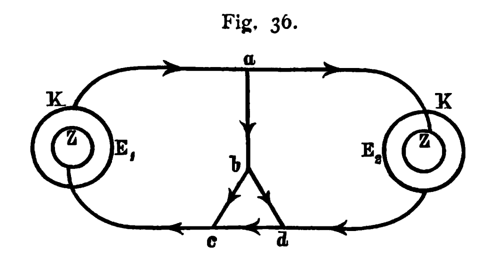
$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{w_3\, w_6 - w_2\, w_5 + b\, w_3}{(w_1 + w_2 + w_3)\, w_5 + w_1\, w_2 + a\, (w_5 + w_2)}$$

oder zusammen mit der früheren Gleichung

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{b\,.\,w_3}{a\,(w_5 + w_2)}.$$

Man hat daher nur die Widerstände w_2, w_3 und w_5 zu messen und alsdann a und b zu bestimmen, um das Verhältniss der beiden elektromotorischen Kräfte zu erhalten.

Fig. 36.



Eine Abänderung der Poggendorff'schen Messmethode hat Clarke angegeben und dieselbe als Messung mit dem Potentiometer bezeichnet.

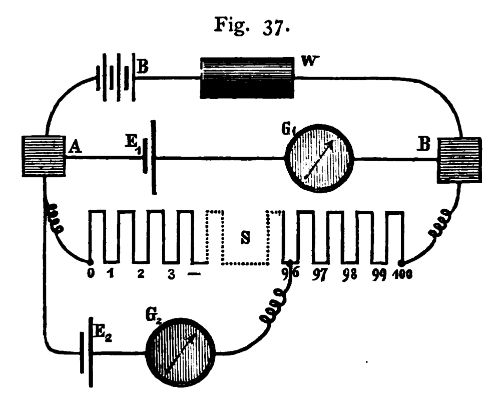
Dieselbe unterscheidet sich von der Poggendorff'schen darin, dass die Compensation nicht durch die zu vergleichenden Elemente gegenseitig, sondern durch eine besondere Batterie erzielt wird.

Die Anordnung der Elemente und Mess-Instrumente für diese Methode ist in Fig. 37 gegeben.

Die Pole einer Batterie B sind, nachdem in die Leitung ein Rheostat W eingeschaltet ist, an den Messingklötzen A und B befestigt. Ebenfalls an diesen Klötzen liegen die gleichen Pole des einen (E_1) der zu vergleichenden Elemente, in dessen Leitung ein Galvanometer G_1

eingeschaltet ist. Ferner liegen an A und B die beiden Enden eines Widerstandes S, der in 100 gleiche Theile getheilt ist. Die Verbindungsstellen je zweier nebeneinander liegender Theile stehen mit einem Messingstück in Verbindung, das auf der Aussenseite des Kastens befestigt ist, in welchem die hundert Theilwiderstände liegen. Das Messingstück hat eine conische Bohrung, in welche ein Stöpsel mit Zuleitung gesteckt werden kann.

Fig. 37.



Das zweite Element, E_2, liegt nun mit einem Pole an dem Metallstück A, an welchem auch der gleichnamige Pol der Batterie B liegt; mit dem anderen Pol wird es aber an eine der Verbindungsstellen der Theilwiderstände gelegt, indem man den Stöpsel, welcher sich an der Leitung des Poles befindet, in die Bohrung des betreffenden Metallstückes steckt. In die Leitung des Elementes E_2 ist ebenfalls ein Galvanometer eingeschaltet.

Um mit diesem Potentiometer zu messen, wird zunächst E_2 ausgeschaltet und darauf der Rheostat W

so geändert, dass der Strom in der Leitung des Elementes E_1 verschwindet. Dann hat das Element E_1 in A und B die gleiche Spannung, wie die Batterie.

Nunmehr sucht man diejenige Verbindungsstelle in dem Widerstande S, deren Spannungs-Differenz die gleiche mit derjenigen an den Polen des Elementes E_2 ist. Dies geschieht, indem wir den einen Pol von E_2, dessen anderer schon an A liegt, durch den Stöpsel seiner Leitung mit derjenigen Verbindungsstelle des Widerstandes S in Verbindung bringen, für welche das Galvanometer G_2 keinen Ausschlag giebt. Denn alsdann ist die Spannungs-Differenz zwischen den beiden Anlegepunkten sowohl für die Batterie B wie für das Element E_2 gleich, und es entsteht zwischen B und E_2 kein Ausgleich, und umgekehrt zeigt die Stromlosigkeit in der Leitung von E_2 die Gleichheit der Spannung an.

Ist nun die Spannung in A und B gleich e, so wird die Spannung zwischen dem Ende und dem Anfange jedes Theilwiderstandes in S gleich, einem Hundertstel von e sein. War der Ausgleich in E_2 durch Einschaltung von z. B. 22 Theilwiderständen zwischen A und dem Stöpsel von E_2 erreicht, so wird die elektromotorische Kraft von E_2 gleich $\frac{22}{100} e$ sein. Die elektromotorischen Kräfte von E_2 und E_1 werden sich also verhalten wie

$$\frac{\frac{22}{100} e}{e} = \frac{22}{100}$$

da E_1 die gleiche Spannungs-Differenz mit A und B hat.

Um also nach dieser Methode zu messen, hat man nur den Rheostaten W so lange zu ändern, bis G_1 die

Stromlosigkeit seiner Leitung anzeigt, und darauf durch successive Einschaltung so viele Theile des Widerstandes *S* zwischen *A* und den zweiten Pol von E_2 einzuschalten bis auch G_2 Stromlosigkeit anzeigt.

Nachstehend ist noch eine kleine Zusammenstellung der elektromotorischen Kräfte einiger Elemente gegeben, bei welcher diejenige des Daniell'schen gleich 100 gesetzt ist.

Daniell	100
Grove	180
Bunsen	170—180
Mariè Davy *)	126
Leclanché	140

VII.
Die Leitungen.

1. Die Constanten der Leitungen.

Die ausgedehnten Leitungen grösserer elektrotechnischer Anlagen machen wegen ihres erheblichen ökonomischen Werthes und der Sicherheit des Betriebes eine fortwährende Ueberwachung nothwendig, welche zum grossen Theile mittelst regelmässiger elektrischer Messungen ausgeführt wird.

Diese Messungen beziehen sich auf den Widerstand, die Isolationsfähigkeit und Capacität der Leitung, deren

*) Vergl. den IV. Bd. dieser Bibliothek, S. 214.

Aenderungen Kunde von etwaigen Störungen zu geben vermögen. Von den gewöhnlichen Messungen unterscheiden sie sich insofern, als man es hier mit Leitungen von beträchtlichen Längen zu thun hat, deren Endpunkte manchmal meilenweit auseinander liegen, Umstände, welche oft Modificationen der bisher dargestellten Messmethoden nöthig machen oder gar die Anwendung durchaus neuer und eigenthümlicher Verfahren erfordern. Im Folgenden sollen die gebräuchlichen Methoden beschrieben werden, wobei mit der Messung des Widerstandes begonnen wird.

Hat man beide Enden einer zu messenden Leitung an dem Orte, an welchem die Messung vorgenommen wird, so hat die Bestimmung des Widerstandes keine Schwierigkeit und wird nach den früher dargestellten Methoden, am einfachsten mittelst der Wheatstone'schen Brücke gemacht.

Handelt es sich aber um die Bestimmung des Widerstandes einer schon aufgestellten Leitung, deren Enden an zwei verschiedenen Stationen liegen, so bedarf es wenigstens noch einer zweiten Leitung zwischen den beiden Stationen, damit der Widerstand bestimmt werden kann. Man verbindet dann an der einen Station die beiden Enden der Leitungen, so dass man an der anderen Station die beiden Enden einer einzigen ununterbrochenen Leitung zu seiner Verfügung hat und so den Gesammtwiderstand der beiden combinirten Drähte bestimmen kann. Eine solche Verbindung zweier Leitungen wird Schleife genannt.

Ist der Widerstand dieser Schleife gleich U, so wird, wenn w_1 und w_2 die Widerstände der beiden

Leitungen bedeuten, $U = w_1 + w_2$ sein. Legt man nun an der ersten Station erst die eine Leitung, dann die andere an Erde, und misst jedesmal an der zweiten Station den Widerstand zwischen der Erde und demjenigen Ende der Leitung, das sich auf dieser Station befindet, so erhält man

$$v = w_1 + W \qquad w = w_2 + W,$$

wo v und w die gemessenen Widerstände, W den Widerstand der Erdleitung bedeutet. Aus den drei Gleichungen erhält man die drei Widerstände

$$2 w_1 = U + v - w;\ 2 w_2 = U - v + w;\ 2\ W = v + w - U.$$

Diese Methode hat den Fehler, dass bei Benutzung der Erdleitung Erdströme auftreten können, die zu Irrthum Anlass geben. Wo es daher möglich ist, benutzt man noch einen dritten Draht zwischen den beiden Stationen, mittelst dessen Zuhilfenahme man drei Schleifen herstellen kann.

Wo die directe Messung des Widerstandes nicht angänglich ist, muss derselbe durch Berechnung aus der Länge, dem Querschnitt und der Leitungsfähigkeit des Drahtes ermittelt werden.

Zur Messung der Isolationsfähigkeit einer Leitung kann man sich zweier Methoden bedienen, von denen die eine den Strom misst, welcher durch das Isolationsmittel hindurch geht, die andere dagegen den Ladungsverlust als Massstab für die Isolationsfähigkeit benutzt. Die erstere Methode ist die bequemere, die zweite aber die genauere.

Zur Ermittelung des Stromes, welcher durch die Isolation geht, wird das eine Ende der Leitung isolirt, das andere mit dem einen Pol einer Batterie von hoher Spannung verbunden und in die Verbindung ein Gal-

vanometer eingeschaltet. Der andere Pol der Batterie ist mit der Erde verbunden.

Wird nun die Leitung mit der Batterie verbunden, so erfolgt ein starker Ausschlag des Galvanometers, indem Elektricität in die Leitung strömt und diese ladet. Sobald die Dichtigkeit in der Leitung die gleiche mit der an den Polen ist, wird nur so viel Elektricität in die Leitung einströmen, als durch die Isolation hindurch ausströmen kann. Es wird daher die Nadel des Galvanometers zurückgehen und in einer Ablenkung stehen bleiben, welche der Intensität des durch die Isolation gehenden Stromes entspricht. Diese letztere Ablenkung wird demnach die Isolationsfähigkeit der Leitung bestimmen.

Will man die Isolationsfähigkeit aus dem Sinken der Dichtigkeit der Ladung messen, so kann man hierzu sowohl das Galvanometer als auch das später zu beschreibende Thomson'sche Elektrometer benutzen. Bei der Anwendung des Galvanometers verfährt man folgendermassen: man isolirt das eine Ende der Leitung und verbindet das andere, nach Zwischenschaltung eines Galvanometers mit dem einen Pole einer Batterie, deren anderer Pol an Erde liegt. Man ladet nun die Leitung und misst den Ladungsausschlag L. Alsdann bleibt die Leitung t Minuten isolirt und wird darauf entladen und der Entladungsausschlag l gemessen.

Ist dann C die Ladungsfähigkeit der Leitung, so ist der Isolationswiderstand $w =$

$$\frac{25{\cdot}5\, t}{C(\log L - \log l)} \text{ Mill. Ohm.}$$

Ist der Ladungsverlust sehr gross, so wird der Entladungsausschlag nur klein; für diesen Fall empfiehlt es

sich, die Leitung nicht zur Erde zu entladen, sondern aufs Neue mit der Batterie in Verbindung zu setzen und so den Verlust durch die nachströmende Ladung zu ermitteln. Ist diese L_1, so ist statt L der Ausdruck $L - L_1$ zu setzen.

Die Messung mittelst Elektrometer hat vor der eben beschriebenen Methode den Vorzug, dass sie die Anwendung von nur kurzen Leitungsstücken erfordert. Das Elektrometer misst nämlich die Dichtigkeit unmittelbar, während das Galvanometer diese Grösse aus der Quantität und diese aus der Intensität der Elektricität bestimmt. Da nun die Dichtigkeit der Elektricität auf der ganzen Länge die gleiche ist und nicht von dieser abhängt, so genügt für das Elektrometer schon ein kurzes Stück Leitung zur Isolationsmessung.

Hat man an einem solchen die Dichtigkeiten D und d bestimmt, welche die Leitung an zwei Zeitpunkten hatte, die um t Minuten auseinander lagen, so ist der Isolationswiderstand

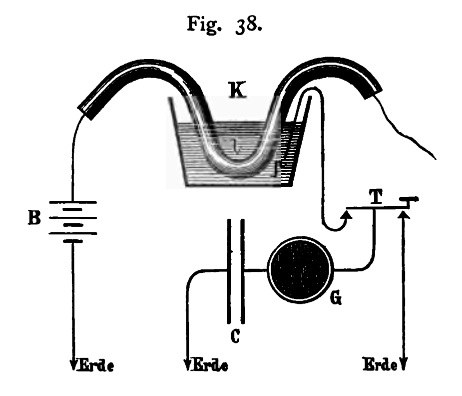
$$w = 25{\cdot}5 \frac{t}{(\log D - \log d)} \text{ Mill. Ohm.}$$

Eine besondere Aufmerksamkeit in Bezug auf die Prüfung der Isolationsfähigkeit erfordern die Löthstellen der Kabel, an denen leicht grössere Isolationsfehler auftreten. Da diese Prüfung sich nur über ein kurzes Stück des Kabels erstreckt, so ist der Querschnitt, durch welchen Elektricität austreten kann, nur gering, und dem entsprechend auch die Quantität Elektricität, welche durch das Isolationsmittel geht. Um diese Spur dennoch wahrnehmbar zu machen, sammelt man sie in einem Condensator, den man nach Verlauf einer bestimmten Zeit entladet.

Zur Prüfung des Kabels K in dieser Weise wird das eine Ende desselben mit dem einen Pol einer Batterie B von hoher Spannung, deren anderer Pol an Erde liegt, verbunden; das andere Ende ist isolirt. (Fig. 38.)

Die Löthstelle l wird alsdann unter Wasser gebracht, indem man sie in einen isolirt aufgestellten Trog taucht. Ebenfalls in diesen Trog taucht die Platte p, welche in Verbindung mit dem Schlüssel T steht, welcher den Con-

Fig. 38.



densator C entweder mit dieser Platte oder mit der Erde verbinden kann. Die zweite Belegung des Condensators ist mit der Erde verbunden. Wird nun derselbe mit p verbunden, so wird er sich, falls die Löthstelle der Elektricität einen Durchgang gewährt, allmählich laden, und die Grösse der Ladung innerhalb einer gewissen Zeit wird einen Massstab für die Isolationsfähigkeit der Löthstelle abgeben. Die Messung der Ladung geschieht einfach dadurch, dass der Condensator durch das eingeschaltete Galvanometer zur Erde entladen wird, indem

man mittelst des Schlüssels die Verbindung zwischen C und p aufhebt und die Erdverbindung herstellt.

Die Messung der Ladungsfähigheit einer Leitung bietet nichts Neues dar; sie geschieht durch Vergleichung der Ladung der Leitung mit der eines justirten Condensators. Die Methoden, die hier zum Ziele führen, sind schon im Abschnitt V dargestellt worden, und es erübrigt hier nur noch, auf eine Eigenthümlichkeit der unterirdischen und submarinen Kabel hinzuweisen.

Während nämlich die Ladungsfähigkeit oberirdischer Linien nur eine sehr geringe ist, haben die Erd- und die submarinen Leitungen sehr hohe Capacitäten. Die Ursache hievon ist, dass diese Leitungen Condensatoren im grossen Massstabe bilden, indem die Metallader, die isolirende Hülle und die aussen anliegende Feuchtigkeitsschicht zusammen einen Ansammlungs-Apparat für Elektricität bilden, der genau ebenso functionirt wie ein Condensator.

Diese Ladungsfähigkeit der Kabel bildet eine werthvolle Constante derselben, weil sie zusammen mit dem Widerstande und der Isolationsfähigkeit ein Mittel zur Controle der Leitung bildet.

2. Die Fehlerbestimmungen bei Leitungen.

Die Kenntniss der Constanten einer Leitung setzt uns in den Stand, einen Fehler derselben zu entdecken und von der Station aus zu bestimmen, so dass hierdurch eine Inspection der ganzen Linie, die unendlich viel Zeit und Mühe kosten würde, nicht nöthig ist.

Das Dasein eines Fehlers verräth sich alsbald durch eine ungewöhnliche Aenderung der Constanten. Die-

selben, obwohl nicht ganz unveränderlich, bewegen sich doch bei unbeschädigter Leitung innerhalb enger Grenzen und dürfen daher auch Constante genannt werden. Jede ungewöhnliche Veränderung derselben zeigt an, dass ein Fehler entstanden oder im Entstehen ist. Hat sich eine solche gezeigt, so gilt es zu ermitteln, an welcher Stelle der Fehler liegt.

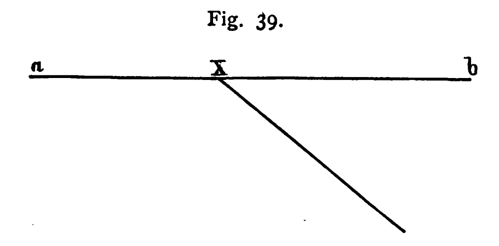
Zuvor aber wird man sich fragen, welcher Art der Fehler sein kann. Zwei Hauptfälle sind möglich, welche beide eine verschiedene Behandlung erfordern. Ist nämlich ein Fehler entstanden, so kann er entweder die Leitung oder richtiger die Ableitung der Elektricität von der Station A gänzlich aufheben, oder er kann bei ungeänderter Ableitung die Elektricität ganz oder theilweise an andere Stellen, als die Station B, ableiten. Im ersteren Falle ist die Leitung unterbrochen und isolirt. Im zweiten Falle ist die Leitung zur Erde abgeleitet oder mit einer anderen Leitung in Contact.

Zunächst soll der Fall behandelt werden, dass die Leitung mit der Erde in Verbindung ist und hierdurch die Verbindung zwischen Station A und B entweder ganz oder theilweise aufgehoben ist.

Für den ersteren Fall bestimmen A und B, jede für sich den Widerstand, welchen der Strom von der Station bis zur Fehlerstelle und durch die Erde zurück hat. Sind diese beiden Widerstände W und w, so wird der Fehler an einer Stelle liegen, welche den Gesammtwiderstand der Leitung in zwei Theile theilt, die sich wie $\frac{W}{w}$ verhalten. Ist der Widerstand der Leitung auf der ganzen Linie gleichmässig vertheilt, also proportional der Länge,

so liegt der Fehler in Entfernungen von A und B, die sich wie $\frac{W}{w}$ verhalten. Hier ist aber eine Voraussetzung in Betracht zu ziehen, die nämlich, dass auch der Widerstand der Erdleitungen proportional der Länge ist und keine Erdströme auftreten. Da diese Voraussetzungen keineswegs immer zutreffen, so bleibt die geschilderte Methode eine unsichere, die man, wo immer nur angänglich, durch andere zu ersetzen sucht.

Fig. 39.



Ist die Verbindung mit der anderen Station nicht ganz unterbrochen, so kann man zur Bestimmung des Fehlers in folgender Weise verfahren:

Es sei W der Widerstand der unzerstörten Linie, welcher aus früheren Messungen bekannt ist. Ist das Dasein eines Fehlers constatirt, so misst man den Widerstand der Linie einmal, indem B das andere Ende der Leitung an Erde legt, zweitens, indem das Ende isolirt ist.

Diese beiden Widerstände sollen als W_1 und W_2 bezeichnet werden.

Ist nun (Fig. 39) x der Widerstand der Leitung von A bis zum Fehler, y der Widerstand vom Fehler bis B und durch die Erde zurück nach A, ferner z der Widerstand der Erdleitung vom Fehler aus, so ist

$$W = x + y$$

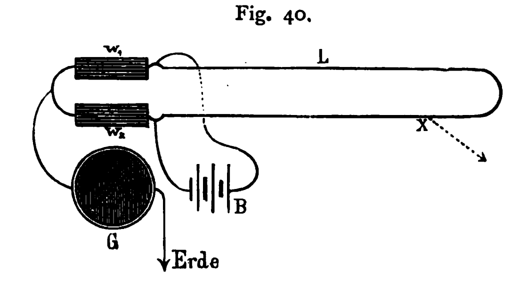
$$W_1 = x + \frac{y\,z}{y + z}$$

$$W_2 = x + z$$

$$x = W_1 - \sqrt{(W_2 - W_1)\,(W - W_1)}$$

Wenn ausser der fehlerhaften Leitung noch eine andere intacte Leitung zwischen den beiden Stationen zur Verfügung steht, so kann man die Fehlerbestimmung durch Benutzung der zweiten Leitung sicherer

Fig. 40.



und bequemer ausführen. Man lässt die Station B die Enden der beiden Leitungen mit einander verbinden und hat so eine Schleife, in welcher der Fehler liegt. Die Enden dieser Schleife legt man an eine Wheatstone'sche Brücke an und bestimmt, indem man die Erdleitung als Brücke benutzt, das Verhältniss der Widerstände, in welche der Fehler x den Gesammtwiderstand der Schleife theilt.

Fig. 40 giebt das Schema dieser Schleifenprobe. w_1 und w_2 sind variable Widerstände, welche den einen Zweig der Brücke bilden. Den zweiten Zweig bildet die Schleife. Demgemäss werden die Pole der Batterie B an denjenigen Stellen angelegt, wo die Widerstände mit der

Schleife zusammenstossen. Von der Verbindungsstelle der beiden Widerstände geht eine Erdleitung aus, die durch ein Galvanometer führt. So lange nun die vier Widerstände w_1, w_2, $\overline{xA}$ und $\overline{xBA}$ — wenn A und B die Stationen bezeichnen — nicht in dem Verhältnisse

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{\overline{xBA}}{\overline{xA}}$$

sind, wird ein Strom durch das Galvanometer gehen. Sobald dieses keine Ablenkung mehr zeigt, ist die Gleichheit erreicht und es kann dann aus dem Verhältnisse $\frac{w_1}{w_2}$ und dem bekannten Widerstande der beiden zu einer Schleife vereinigten Linien, W_1 und W_2, die Lage des Fehlers in Widerstandsmassen und aus diesen in Längsmassen ermittelt werden.

$$W_1 + W_2 = \overline{xA} + \overline{xBA}$$

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{\overline{xBA}}{xA}$$

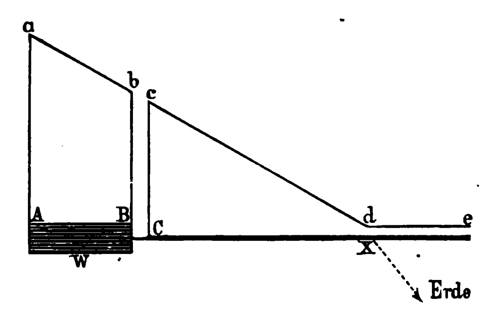
$$x\,A = \frac{w_2\,(W_1 + W_2)}{w_1 + w_2}$$

Ein weiteres Hilfsmittel zur Entdeckung von Fehlern giebt uns das stetige Sinken der Dichtigkeit längs der Linie an die Hand. Bezeichnet in Fig. 41 x die Stelle des Fehlers, so wird, wenn das eine Ende der Leitung isolirt ist, das andere an einer Batterie liegt, deren zweiter Pol zur Erde abgeleitet ist, die Dichtigkeit von der Batterie ab stetig mit wachsendem Widerstande sinken bis zu der Ausströmungsstelle x, von wo ab sie constant bleibt. Kennt man nun das Gefälle der Dichtigkeit pro Widerstands-Einheit, ferner den Anfangs- und

Endwerth derselben, so kann man die Lage des Fehlers in Widerstands-Einheiten und daraus in Längen-Einheiten berechnen.

Zu diesem Zwecke schaltet man zwischen Batterie und Leitung den Widerstand *W* ein und misst, nachdem die andere Station das andere Ende der Leitung isolirt hat, die Dichtigkeit vor und hinter dem Widerstande *W*. Dieselben sollen mit *a* und *b* bezeichnet werden. Die andere Station misst gleichzeitig die Dichtigkeit *e*, welche

Fig. 41.



am isolirten Ende herrscht. Es verhält sich dann, wenn der Widerstand zwischen *C* und *x* mit C_x bezeichnet wird,

$$\frac{a - e}{b - e} = \frac{C_x + W}{W}$$

$$C_x = \frac{a - b}{b - e} W.$$

Die Bestimmung der Dichtigkeit kann entweder nach der im Abschnitt IV dargestellten Condensator-Methode oder mittelst des Quadranten-Elektrometers vorgenommen werden.

Ist eine Leitung mit einer anderen in Contact und befinden sich zwei Enden beider Leitungen an einer Station, so kann diese den Widerstand, gerechnet von der Station aus bis zur Contactstelle und von dieser durch die zweite Leitung zur Station zurück, messen, und falls der Fehler als gleich weit auf beiden Linien anzunehmen, die Lage desselben bestimmen.

Schwieriger ist der Fall, in welchem zwei Leitungen in Contact sind, die je zwei Stationen verbinden. Seien A, B, C und D die Stationen und $\overline{AB}$ und $\overline{CD}$ ihre Leitungen, AB und CD die Widerstände derselben. Um nun die Lage des Fehlers x zu ermitteln, sucht Station A, bei isolirtem Ende in B, successive den Widerstand AxC und AxD zu ermitteln. Die Summe dieser beiden Widerstände abzüglich CD ist alsdann gleich $2\,Ax$. Indem die anderen Stationen in gleicher Weise verfahren, werden für die Lage des Fehlers weitere Daten gewonnen, aus denen derselbe mit erhöhter Sicherheit gefunden werden kann.

Was den letzten Fall der Fehlerbestimmung angeht, bei welchem die Leitung unterbrochen ist, ohne in Contact mit einer anderen Leitung oder der Erde zu sein, so muss man sich hierbei an die Ladungsfähigkeit halten, welche proportional der Länge der Leitung ist. Durch das Eintreten eines Bruches bleibt nun für die Station nur noch der Theil der Leitung bis zum Bruche ladungsfähig.

Das Verhältniss der Capacität dieses Theiles zu derjenigen der unzerstörten Leitung giebt auch das Verhältniss dieser beiden Theile und damit die Lage des Fehlers an.

Diese Messmethode ist aber nur für Erd- und submarine Leitungen geeignet; die oberirdischen Linien haben eine zu geringe Ladungsfähigkeit und zu geringe Isolation, um die Anwendung einer solchen Messung als tauglich erscheinen zu lassen.

VIII.
Elektrischer Aufwand und Leistung.

Die Elektricität dient in ihrer technischen Verwendung lediglich als Zwischenform. Sie wird aus anderen Kraftformen erzeugt und wieder in solche zurückgeführt, blos weil sie ein ausgezeichnetes Uebergangsmittel bildet.

Dabei tritt nun die Frage in den Vordergrund, wie viel von der einen Form aufzuwenden ist, um ein gewisses Quantum der anderen zu erhalten. Physikalisch ist dieses Verhältniss bekanntlich ein unveränderliches; dagegen ist es in der Technik wegen der unvermeidlichen Verluste ein schwankendes, das von vielerlei Factoren abhängt. Diese Factoren zu ermitteln und zu benutzen oder zu beseitigen und das Verhältniss

$$\frac{\text{Leistung}}{\text{Aufwand}}$$

zu einem möglichst grossen zu gestalten, ist eine der Hauptaufgaben der Technik, deren ökonomische und culturelle Bedeutung sich hauptsächlich auf diese Thätigkeit gründet.

Die Elektricität als Zwischenform nimmt nun bei jenem Verhältniss eine doppelte Stellung ein, einmal als Leistung, das andere Mal als Aufwand, und bedarf zur Ermittelung des schliesslichen Werthes jenes Bruches einer doppelten Messung. Das Verhältniss wird also durch die Einschiebung der Elektricität ein Doppelverhältniss von der Form

$$\frac{\text{Elektricität}}{\text{aufgewendete Kraft}} \cdot \frac{\text{geleistete Kraft}}{\text{Elektricität}}$$

Wegen der unvermeidlichen Verluste ist die Elektricität in diesen Verhältnissen als Aufwand und als Leistung verschieden, und es bedarf in jedem einzelnen Falle einer Untersuchung beider Factoren jenes Doppelverhältnisses, damit für beide die Verlustquote bekannt wird. Ohne diese Messungen könnte man leicht verführt werden, der Elektricität in der einen Form, z. B. als Leistung Schuld an dem Verluste zu geben, während diese Schuld bei dem anderen, bei dem elektrischen Aufwande lag, der mit zu viel Verlust arbeitete.

Besonders scharf ist der Unterschied zwischen der Elektricität als Leistung und als Aufwand bei der Uebertragung ausgeprägt, die eine doppelte sein kann, eine räumliche und eine zeitliche. Die räumliche Uebertragung geschieht durch Leitung und hat eine unvermeidliche, oder doch bis jetzt noch unvermeidliche Verlustursache in der Wärme-Entwickelung im Leiter. Die zeitliche Uebertragung der Elektricität ist, wie überhaupt die zeitliche Uebertragung von Kraft, ein bis jetzt noch ungelöstes Problem der Technik, dem aber die allergrösste Bedeutung zugeschrieben werden muss, weil durch die Lösung desselben eine vollständige Umgestal-

tung der heutigen technischen Verhältnisse bewirkt werden wird. — Diese zeitliche Uebertragung wird durch Aufspeicherung der Elektricität erzielt*).

---

*) Ich möchte an dieser Stelle einer Meinung über die Lösung des Problems der Aufspeicherung von Elektricität, der heutzutage so viele Erfinder nachstreben, Ausdruck geben. Es scheint mir nämlich, dass der bis jetzt eingeschlagene Weg, nämlich die Aufspeicherung mittelst secundärer Elemente zu erzielen, ein principiell verkehrter ist. Die Grundidee der Aufspeicherung ist: Eine Spannungsdifferenz zu bewirken und zu erhalten. Wie die Spannungsdifferenz erzielt wird, ist an sich gleichgiltig; ob durch Veränderung der Elasticitäts-Verhältnisse oder durch jene Potentialveränderung, welche die chemische Verschiedenheit der Stoffe bezeichnet — denn auf einem solchen quantitativen und nur quantitativen Unterschiede beruhen die chemischen Erscheinungen — alles das ist ganz gleichgiltig. Und eben so gleichgiltig ist es, wodurch man jene Spannungs-Differenz erzielt, ob durch Elektricität oder Wärme, oder durch eine andere Kraftform. Demnach bedeutet Aufspeicherung von Elektricität nichts Anderes als die Bewirkung und Erhaltung einer Spannungs-Differenz, welche in Form von Elektricität frei wird. Jede Einschränkung dieser allgemeinen Auffassung muss als Pedanterie erscheinen.

Um nun auf die secundären Elemente zurückzukommen, so sehen wir bei ihnen, dass die Bewirkung, Erhaltung und Ausgleichung der Spannungs-Differenz in ein und demselben Apparate stattfindet. — Das ist darum als Fehler anzusehen, weil durch die Dimension des Elementes eine Schranke für das Mass der Aufspeicherung gesetzt wird. Darum muss der Apparat, in welchem die Differenzirung der Spannung, derjenige, in welchem die Aufbewahrung der differenzirten Spannungen, endlich der Apparat, in welchem der Wiederausgleich unter Elektricitäts-Entwickelung, die »elektrische Verbrennung«, wie ich sie nennen möchte, stattfindet, alle drei Theile, welche die drei Phasen der Aufspeicherung bezeichnen, ganz von einander getrennt sein, damit hierdurch eine, wenn auch nicht unbeschränkte Befreiung von der Dimension erzielt wird. Als das Ideal der Aufspeicherung der Elektricität muss die chemische Synthese und elektrische Verbrennung der Kohlen-

Auch hier treten Verluste mit der Zeit, wie oben Verluste mit der Entfernung auf, indem ein langsamer Ausgleich der aufgespeicherten Elektricitäten kaum zu vermeiden sein wird.

Bei der Uebertragung findet nun ein ganz besonders auffälliges Missverhältniss zwischen der aufgewendeten und geleisteten Elektricität statt, weil beide Grössen gleicher Art sind und mit denselben Methoden und Instrumenten gemessen werden können, so dass die Beobachtungsfehler und die Verluste, welche die Messung selbst verursacht, ein Minimum werden.

Was die Messung der Elektricität bei dem Verhältniss

$$\frac{\text{Leistung}}{\text{Aufwand}}$$

angeht, so bietet sie nach den früheren Darstellungen keine Schwierigkeiten, doch machen besondere Verhältnisse zuweilen Modificationen nothwendig, welche im Folgenden berührt werden sollen. Zunächst soll jedoch eine Uebersicht über die Messung der anderen Kraftformen gegeben werden.

Die **Messung der Arbeit** geschieht entweder nach der Einheit Meter-Kilogramm oder nach Pferdekräften, welche man häufig mit den Anfangsbuchstaben des englischen Ausdruckes Horse Power mit *HP* bezeichnet. Die Einheit *HP* wird gleich 75 Mtr.-Kgr. angenommen, d. h. eine Pferdekraft kann einem Gewichte von einem Kilogramm die constante verticale Geschwindigkeit von 75 Mtr. pro Secunde ertheilen, kann also ein Kilogramm

wasserstoffe bezeichnet werden, welche die beste Form aufgespeicherter Kraft darbieten.

in der Secunde 75 Mtr., oder, was dasselbe, 75 Kgr. einen Meter hoch heben.

Zur Messung wendet man die Dynamometer an, von denen mannigfache Constructionen erdacht sind. Es macht einen Unterschied, ob die zu messende Arbeit als Aufwand oder als Leistung gemessen werden soll. Im ersteren Falle wird sie von der arbeiterzeugenden Maschine auf die consumirende übertragen und muss in der Uebertragung gemessen werden. Ist die Uebertragung eine Riemen-Uebertragung, so kann zur Messung der v. Hefner-Alteneck'sche Arbeitsmesser dienen, welcher die Differenz der Spannungen an dem ziehenden und gezogenen Riementheile zur Bestimmung der übertragenen Arbeit benutzt. Eine eingehende Darstellung der Theorie und Construction dieses Mess-Instrumentes findet man in der Elektrotechnischen Zeitschrift, Jahrgang 1881, S. 229.

Für Uebertragung von Arbeit durch directe Kuppelung, durch Zug etc. dienen Feder-Dynamometer. Ein solches von Perry und Ayrton ist im I. Bande dieser Bibliothek beschrieben worden.

Die Messung der geleisteten Arbeit wird am einfachsten mittelst des altbekannten Prony'schen Zaumes vorgenommen.

Zur Messung der Wärme, der erzeugten oder verbrauchten, wird die Temperatur bestimmt, auf welche das zu bestimmende Wärmequantum die Gewichts-Einheit eines bestimmten Stoffes, z. B. des Wassers, von der Temperatur Null Grad erhöhen kann. Zu diesem Zwecke umgiebt man die zu messende Wärmequelle, z. B. den durch Elektricität erhitzten Draht mit Wasser, nachdem man Sorge getragen hat, jeden Wärmeverlust des er-

hitzten Wassers zu vermeiden. Als Mass des Wärmequantums dient die Calorie, d. h. die Quantität Wärme, welche ein Kilogramm Wasser um 1^0 Celsius erwärmt.

Aus der Physik ist es bekannt, dass Arbeit und Wärme einander äquivalent sind, d. h., dass ein gewisses Quantum der einen ein entsprechendes festes Quantum der anderen erzeugen kann. Das Verhältniss der beiden Quanta ist zuerst von Joule in einer sorgfältigen und ausgedehnten Experimental-Untersuchung ermittelt worden. Joule findet, dass einer Calorie eine Arbeit von 450 Kgr.-Mtr. entspricht.

In der Praxis wird sich aber dieses Verhältniss wegen der unvermeidlichen Verluste ganz anders gestalten, und es bildet alsdann die grössere oder geringere Annäherung an jenes verlustfreie Verhältniss einen Anhalt für die Güte des gewählten Kraftverwandlungs-Verfahrens.

Als ein hierher gehöriges Beispiel möge folgender Fall dienen. In unseren Dampfmaschinen wird Wärme in Arbeit umgesetzt. Diese Arbeit kann alsdann mittelst dynamoelektrischer Maschinen in Elektricität umgesetzt werden. Nun wissen wir, dass sowohl bei der Arbeits-Erzeugung durch Dampfmaschinen, als auch bei Elektricitäts-Erzeugung durch Dynamo-Maschinen ein erheblicher Theil der aufgewendeten Kraft verloren geht. Es muss daher sich das natürliche Bestreben geltend machen, die Arbeits-Erzeugung bei Elektricitäts-Erzeugung ganz zu vermeiden und eine directe Umsetzung von Wärme in Elektricität anzustreben. Gesetzt, wir besässen ein solches Verfahren, das für Elektricitäts-Erzeugung im Grossen geeignet wäre, so würden die beiden genannten Methoden der Erzeugung von Elektricität in Concurrenz

miteinander treten. In diesem Streite würde alsdann das Verhältniss

$$\frac{\text{erzeugte Elektricität}}{\text{aufgewendete Wärme}}$$

entscheidend sein. Je mehr es sich für eine Methode der Kraftverwandlung dem verlustfreien Verhältnisse nähert, um so mehr Werth ist dieser Methode zuzusprechen.

Dabei ist durchaus nicht die Möglichkeit ausgeschlossen, dass diejenige Methode die bessere ist, welche durch eine grössere Reihe von Zwischenformen auf die zu erzeugende Form führt. In den beiden Transformationsreihen

Wärme—Arbeit—Elektricität

und

Wärme—Elektricität—Arbeit

kann möglicherweise die Arbeits-Erzeugung aus Wärme bei der zweiten Reihe eine ökonomischere sein als bei der ersten, trotzdem sie eine Zwischenform mehr hat. In diesem Falle würde man sich in Zukunft nicht mehr der Dampfmaschine zum Erzeugen von Elektricität bedienen, sondern der »Thermo-Elektromotor« würde die Dampfmaschine überall verdrängen, sobald sein Verhältniss

$$\frac{\text{Arbeit}}{\text{Wärme}}$$

sich mehr dem verlustfreien

$$\frac{450 \text{ Kilogramm-Meter}}{1 \text{ Calorie}}$$

annäherte, als das der Dampfmaschine, welches kein übermässig günstiges genannt werden kann.

Es liegt hierin ein Problem von grosser Tragweite für die Zukunft vor, ein Problem, welches auch in enger Verbindung mit dem Aufspeicherungs-Problem steht, weil hierdurch das Aufspeicherungs-Problem auch dann schon seine Lösung gefunden hat, wenn es uns gelingt, Wärme aufzuspeichern. Aufgespeicherte Wärme kennen wir aber; die Kohle ist ihre überall verbreitete Form. Gelänge es uns nur, der Pflanze das Geheimniss abzulauschen, wie sie die Kohlensäure der Luft zerlegt, so wäre das Aufspeicherungs-Problem für die Wärme gelöst.

Die Messung des Magnetismus, welche bei den Dynamo-Maschinen von erheblicher Bedeutung ist, hat bis jetzt noch wenig Fortschritte gemacht, soweit es die Methoden betrifft, welche in der Praxis anwendbar sind. Der Physiker bedient sich zur Messung der magnetischen Intensität schwingender Magnete, deren Trägheitsmoment und Schwingungsdauer die Bestimmung und Vergleichung magnetischer Intensitäten gestattet. Für die Praxis ist diese Methode platterdings unbrauchbar. Nichtsdestoweniger hat aber die Praxis ein grosses Interesse daran, magnetische Intensitäten mit einer gewissen Genauigkeit bestimmen zu können. Es bildet nämlich die Intensität der magnetischen Felder in den Dynamo-Maschinen eine Grösse, von welcher eine Reihe anderer Grössen bei diesen Maschinen abhängen, und es ist darum von sehr grossem Interesse, Methoden und Instrumente zu ersinnen, welche die Messung dieser Grösse leicht und sicher ausführen lassen.

Als Vorschlag zu einem solchen Magnetometer diene die folgende skizzirte Darstellung eines Elektro-Magnetometers.

Auf einer horizontalen Axe sitzt senkrecht in der Mitte ein kleiner Solenoid, d. h. eine Drahtspirale,*) durch welche ein Strom von bekannter Intensität geschickt werden kann. Die horizontale Axe dreht sich mit möglichst geringer Reibung zwischen Spitzen oder liegt mit Schneiden auf stählernen Backen. Dieses Instrument wird in das magnetische Feld gebracht, dessen Intensität gemessen werden soll. Der vom Strom durchflossene Solenoid sucht sich dann mit seiner Windungsebene senkrecht zum magnetischen Felde zu stellen, wird aber in der Ruhelage festgehalten. Es ist nämlich mit demselben eine Torsionsfeder verbunden, mittelst welcher er auf die Ruhelage zurückgeführt wird. Die Grösse der hierzu nöthigen Torsion, sowie die Stärke des in dem Solenoid kreisenden Stromes geben alsdann das Mass der magnetischen Intensität ab

Für die Einheit dieses Masses ist bis heute noch keine Wahl getroffen, die allgemein acceptirt wäre, obwohl es wünschenswerth erscheint, ein solches magnetisches Mass, welchem die absolute Einheit *C G S* zu Grunde liegt, zu besitzen.

Die chemische Kraft wird durch die Wägung der zersetzten Stoffe gemessen, wie wir schon früher sahen; dieselbe bietet darum nichts Besonderes dar.

---

*) Die Anwendung eines solchen Solenoides könnte wegen der dadurch nöthig gewordenen Mitanwendung des elektrischen Stromes als eine unnöthige Complication erscheinen, weil ein Magnet dieselben Dienste leisten kann. Ein solcher hat aber den Fehler, durch den Magnetismus der zu messenden Maschinen etc. Veränderungen zu erleiden, wodurch die Justirung des Instrumentes illusorisch wird.

Die Lichtmessung, welche sich lediglich auf die Intensität des Lichtes erstreckt, ist im XI. Bande dieser Bibliothek dargestellt. Es soll hier noch Einiges besprochen werden, was dort keinen Platz gefunden hat.

Die Lichtmessung bildet von allen anderen physikalischen Messungen insofern eine Ausnahme, dass sie, wie schon früher angedeutet, nicht auf absolutes Mass zurückgeführt werden kann, weil bei dem Lichte eine messbare mechanische Wirkung nicht gefunden werden konnte.

In Folge dessen ist die Messung dieser Kraftform heute noch unvollkommen, sowohl was die Methoden, als die Instrumente, als auch ganz besonders die Einheiten betrifft. Diese letzteren sind willkürlich gewählte Intensitäten, für welche man eine ganze Reihe von Vorschlägen gemacht hat, von denen aber kein einziger allgemein angenommen ist. Auch fehlt es bis heute noch an einem Kriterium für Normal-Einheiten, so dass wir nie im Stande sind, sagen zu können: Die bei der Messung benutzte Normalflamme hatte wirklich die angenommene Lichtstärke Eins.

Die Methoden und Instrumente sind bis heute ebenfalls mangelhaft geblieben, weil alle auf dem Intensitätsgefühle des Auges basiren. Nun ist zwar das Auge als Mess-Apparat für Längenunterschiede ein hochempfindlicher Apparat, für Farben- und Intensitätsunterschiede aber ein höchst unzuverlässiger. Man ist daher bestrebt gewesen, jene höhere Qualität des Auges für die niedere bei den Lichtmessungen zu substituiren, indem man die Lichtintensität in irgend einer Weise zu einer mechanischen Wirkung zu bringen gesucht hat. Als eine

interessante, wenn auch nicht totale Lösung dieses Problems ist das Selen-Photometer von Dr. W. Siemens anzusehen. Das Selen hat nämlich die Eigenthümlichkeit, seinen elektrischen Widerstand unter Einfluss des Lichtes zu ändern, und die Aenderung hängt von der Intensität der Belichtung ab. Hierauf fussend, hat unser berühmter Erfinder ein Photometer ersonnen, bei welchem der Raumsinn des Auges benutzt wird.

Das besonders präparirte Selenplättchen wird von einem Strome durchflossen und so der Einwirkung der Normalflamme ausgesetzt, wo es dann unter Veränderung seines früheren Widerstandes einen bestimmten Widerstand erhält. Das Plättchen ist in den einen Zweige eines Differential-Galvanometers eingeschaltet; dem anderen Zweige giebt man einen solchen Widerstand, dass die Nadel in die Ruhelage gebracht wird. Wird nun das Selenplättchen der Belichtung der zu messenden Lichtquelle ausgesetzt, so kann durch Annäherung oder Entfernung des Plättchens an die Lichtquelle der gleiche Widerstand wie bei der ersten Belichtung erzielt werden, was an dem Differential-Galvanometer leicht erkannt werden kann. Alsdann ist auch die Intensität der zweiten Belichtung gleich derjenigen der ersten, und die Intensitäten der beiden Lichtquellen verhalten sich wie die umumgekehrten Quadrate der Entfernungen des Selenplättchens von den Lichtquellen.

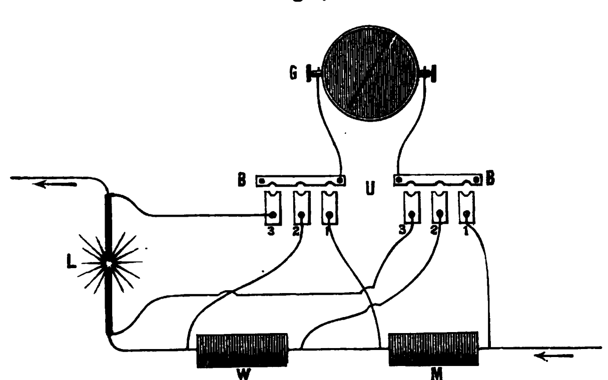
Zur Messung der elektrischen Grössen bedient man sich entweder eines Elektro-Dynamometers für starke Ströme, wie Fig. 19 es darstellt, oder man misst diese Grössen aus Spannungs-Differenzen und bedient sich dabei des Spiegel- oder des Torsions-Galvanometers.

Die Messungen der zweiten Art können ebensowohl zur Bestimmung der Stromstärke wie von Widerständen beliebiger Theile des Stromkreises dienen. Zu diesem Zwecke wird in den Stromkreis ein bekannter Widerstand eingeschaltet, der so gewählt ist, dass die Intensität des Stromes durch ihn möglichst wenig verändert wird; falls ein Ohm zu gross oder zu klein erscheint, wählt man solche Bruchtheile oder Vielfache desselben, welche eine bequeme Rechnung gestatten. Dieser Widerstand bleibt während der ganzen Dauer der Messungen in dem Stromkreise. Misst man nun die Spannungs-Differenz an den beiden Enden des Widerstandes und drückt dieselbe in Volts aus, so ist die Grösse dieser Spannungs-Differenz, dividirt durch den Widerstand, die Stromstärke in Ampères. Misst man ferner an den Enden eines anderen Leitertheiles, durch welchen der gleiche Strom geht, die Spannungs-Differenz, so ist das Verhältniss dieser Spannungs-Differenz zu der an den Enden des »Masswiderstandes«, wie wir ihn nennen wollen, gleich dem Verhältniss der beiden Widerstände, wie wir dies schon im IV. Abschnitte sahen.

Um diese Messungen schnell hintereinander ausführen zu können, werden die Schaltungen in beistehend skizzirter Weise angebracht (vergl. Fig. 42). *G* ist ein Spiegel-Galvanometer, welches für den Fall, dass der Strom zu stark ist, mit einem Nebenschluss versehen wird, der seine Empfindlichkeit auf einen bekannten Bruchtheil herabmindert. *M* ist der Masswiderstand, welcher in die Leitung eingeschaltet ist. *W* endlich bedeutet denjenigen Leitertheil, dessen Widerstand gemessen werden soll, während der Strom in der Leitung kreist.

Die Zuleitungen zu dem Galvanometer sind an den Umschalter *U* geführt, mittelst dessen man das Galvanometer beliebig an *M* oder an *W* legen kann. Ein solcher Umschalter besteht aus einer metallenen Schiene *B*, mit welcher durch Stöpselverbindung, wie wir sie bei dem Widerstandskasten kennen gelernt haben, andere Schienen 1, 2, 3 verbunden werden können. In einer anderen

Fig. 42.



Form sind die Schienen 1, 2, 3 auf der Peripherie eines Kreises angeordnet, und werden durch einen Kurbelcontact mit einem centralen Metallstücke, mit welchem die eine Zuleitung des Galvanometers verbunden ist, in leitende Verbindung gebracht. Durch Drehung des Kurbelcontactes kann das Galvanometer an jede beliebige Schiene angelegt werden.

Ist nun das Galvanometer mit den Hauptschienen zweier solcher Umschalter der ersten Art verbunden, und die Enden des Masswiderstandes *M* mit den Schienen 1, so wird durch Verbindung der Hauptschienen mit den

Schienen 1 das Galvanometer an den Masswiderstand angelegt. Verbindet man weiter W mit 2 und L mit 3, so kann durch Stöpselung der entsprechenden Löcher irgend einer der drei Spannungs-Differenzträger an das Galvanometer gelegt werden, ohne dass dabei viel Zeit und Mühe verloren ginge.

Man legt zunächst das Galvanometer an ein Normal-Element oder an ein Daniell'sches Element, und berechnet die Ablenkung der Galvanometernadel für 1 Volt. Dieselbe ist gleich $\frac{A}{S}$ Scalentheile, wenn A die Ablenkung durch das Normal-Element oder Daniell und S die elektromotorische Kraft der letzteren in Volts bedeutet. Es sei a die Ablenkung für 1 Volt.

Nunmehr werden durch Stöpselung der Löcher von 1 die Enden des Masswiderstandes mit dem Galvanometer verbunden. Beträgt hier die Ablenkung m, so ist die Spannungs-Differenz an diesen Enden gleich $\frac{m}{a}$ Volts und die Stromstärke somit gleich

$$\frac{m}{M\,a} \text{ Ampères}$$

wenn der Widerstand M in Ohms ausgedrückt war.

W findet man leicht, wenn man 2 stöpselt. Erhält man dabei die Ablenkung w, so ist nach dem Gesagten

$$\frac{W}{M} = \frac{w}{m}$$

Diese Methode der Widerstands-Messung ist insbesondere für die Messung des Widerstandes im Lichtbogen der Bogenlampen sowie in den Glühlampen während des Brennens von grosser Bedeutung. Den

ersteren Widerstand würde man mit den bisher dargestellten Methoden gar nicht messen können. Bei den Glühlampen kann man zwar den Widerstand des Kohlenfadens im kalten Zustande nach den gewöhnlichen Methoden bestimmen; für die Widerstands-Messung der glühenden Kohle fehlt aber jeder Anhalt, da selbst, wenn wir das Gesetz und die Coëfficienten der Aenderung des Widerstandes der Kohle mit der Temperatur kennten, uns doch immer die Temperatur des Kohlenfadens unbekannt bliebe.

Durch das dargelegte Verfahren schwindet jede Schwierigkeit bei Messung der in Frage stehenden Widerstände, indem man nur die Spannungs-Differenz an den Ein- und Austrittstellen*) des zu messenden Widerstandes zu bestimmen nöthig hat, um aus dieser und der Spannungs-Differenz des Masswiderstandes den unbekannten Widerstand zu ermitteln. Allerdings bleibt auch hier die Möglichkeit eines Irrthums nicht ausgeschlossen, welcher in der elektrischen Polarisation seinen Grund hat. Durch diese wird ein Gegenstrom erzeugt, welcher die Spannungs-Differenz vermehrt, so dass der Widerstand als zu gross erscheint.

Diese Erscheinung erschwert insbesondere die Messung der Widerstände von flüssigen Leitern, weil bei solchen die Polarisation ganz besonders stark hervortritt.

---

*) Für diese Ein- und Austrittsstellen, deren Spannungs-Differenzen so vielfach zu weiteren Bestimmungen werden, möchte an dieser Stelle die Bezeichnung »Pol« vorgeschlagen werden, so dass dieses Wort auch auf elektricitätconsumirende Theile seine Anwendung finden soll.

Eine weitere Bedeutung gewinnt die Polspannungs-Messung für die Bestimmung des elektrischen Aufwandes. Nach dem Joule'schen Gesetze ist derselbe

$$A = I . E$$

wo I die Stromstärke und E die Polspannung bedeutet. Ist also I aus der Grösse und der Polspannung des Masswiderstandes bekannt, so kann der elektrische Aufwand leicht gefunden werden. Soll er in Kilogramm-Metern ausgedrückt werden, so ist das Product $I . E$ durch die Verhältnisszahl 9·95 zu dividiren, wenn I und E in absolutem Masse gegeben waren. Um A in Pferdekräften zu finden, hat man den in Kilogramm-Metern gegebenen Aufwand durch 75 zu dividiren, da man

$$HP = 75 \ M Kg.$$

angenommen hat.

Die Umsetzung in Calorien ist nach dem früher Gesagten ohne Schwierigkeit, hat aber für die Praxis nur wenig Interesse, weil man für Vergleichungen die Messungen lieber auf Arbeitsmass zurückführt.

Mittelst der angedeuteten Messmethoden und der bekannten Aequivalentzahlen der einzelnen Kraftformen vermögen wir die Verluste zu constatiren, wie sie bei der technischen Umsetzung von Kraft aus einer Form in die andere stets auftreten. Die Kenntniss dieser Verlustgrösse ist an sich schon wichtig, weil dieselbe bei dem Entscheid über den Werth eines Umsetzungsverfahrens wegen der ökonomischen Beziehung ein wichtiges Argument abgiebt. Ausserdem gewinnt aber auch jene Ermittelung noch eine fernere Bedeutung dadurch, dass sie auf die Entwickelung der Kraftverwandlungs-Technik einen grossen Einfluss nimmt. Die Erkenntniss

von dem Vorhandensein eines Verlustes führt zu der Frage nach der Art des Verlustes und von hier aus weiter zu eingehender Beobachtung desselben und damit zu neuer Erkenntniss.

Die Kraftverwandlungs-Technik ist verhältnissmässig noch sehr jung und darum noch wenig entwickelt. Das heutige Verhältniss $\frac{\text{Leistung}}{\text{Aufwand}}$, welches den Massstab für den Fortschritt jenes Zweiges der angewendeten Naturwissenschaft abgiebt, ist noch weit von dem idealen Werthe Eins entfernt. Es kann daher nicht Wunder nehmen, wenn jener Transformations-Factor bei einer grösseren Anzahl Umwandlungen ein bedenklich kleiner wird. — Die Pfunde Kohlen z. B., welche in der Dampfmaschine Arbeit und aus dieser Elektricität erzeugen und den Kohlenfaden der Glühlampen zur Weissgluth bringen, würden etwa hinreichen, 100 solcher Kohlenfaden während derselben Brennzeit in Weissgluth zu erhalten, wenn die Verluste vermieden werden könnten.

Wenn wir nun auch vorderhand nicht hoffen können, die Kraft verlustfrei umzuwandeln, zu übertragen und aufzuspeichern, so dürfen wir doch annehmen, dass die technische Entwickelung der nächsten Jahrzehnte günstigere Transformations-Verhältnisse erzielen wird.

IX.

Die Messung der statischen Elektricität.

1. Die dynamische Wirkung der statischen Elektricität.

Im Vorhergehenden haben wir uns mit der Messung solcher elektrischen Grössen bekannt gemacht, die bei der Bewegung der Elektricität in Leitern auftreten. Eine Ausnahme hiervon machte in gewisser Hinsicht die Ladungsfähigkeit, welche das Verhältniss der Quantität Elektricität, die ein Leiter aufnimmt, zu der Dichtigkeit, welche diese Quantität in dem Leiter erzeugt, bedeutet.

Im Gegensatze zu dieser bewegten (dynamischen) Elektricität — oder Galvanismus — steht die statische (stehende) Elektricität, deren Messung uns im Folgenden beschäftigen soll. Da diese statische Elektricität sich auch bei der durch Ausgleich veranlassten Bewegung von Elektricität findet und Aufschluss über die Vorgänge geben kann, so wird die Messung der statischen Elektricität von erheblicher Wichtigkeit auch für die Messung der dynamischen Elektricität. Denn der Ausgleich zweier Mengen entgegengesetzter Elektricitäten, die durch irgend eine elektromotorische Kraft erzeugt worden sind, kann

wegen des Leitungswiderstandes nicht plötzlich erfolgen. So lange derselbe dauert, ist also ein Theil der Elektricität in Ruhe und hat in dem Leitertheile eine bestimmte Dichtigkeit. Bei fortschreitendem Ausgleich wird diese Dichtigkeit abnehmen; findet aber ein constanter Nachschub und Abfluss statt, so bleibt auch die Dichtigkeit constant, ändert sich aber sofort, sobald Nachschub oder Abfluss sich ändern. Die Veränderung jener Grösse kann also Kunde von den Veränderungen dieser beiden geben.

Seitdem nun in dem Quadranten-Elektrometer von Thomson ein Mess-Instrument für die statische Elektricität geschaffen ist, welches, was Empfindlichkeit und Genauigkeit angeht, dem Spiegel-Galvanometer ebenbürtig an die Seite gestellt werden kann, hat die Messung der statischen Elektricität eine ebensolche Bedeutung gewonnen, wie sie früher die Intensitäts-Messung hatte. Die Stromstärke-Messung, welche vorher die Basis aller anderen elektrischen Messungen abgab, ist jetzt zu einem Theile durch die directe Messung der Dichtigkeit ersetzt worden.

Die Dichtigkeit ist die einzige, bei der Messung der statischen Elektricität in Frage kommende Grösse. Das Princip, das bei Messung derselben zur Anwendung kommt und der Construction aller hierauf bezüglichen Mess-Instrumente zu Grunde liegt, ist das der Abstossung gleichnamiger und Anziehung ungleichnamiger Elektricitäten. Um dieses Princip zu benutzen, werden entweder zwei Leiter, die sich von einander entfernen können, mit der zu messenden Elektricität geladen und die Grösse der Abstossung beider Leiter bestimmt, oder es wird ein

einzelner beweglicher Leiter, der sich zwischen zwei, mit entgegengesetzten Elektricitäten geladenen Körpern befindet, mit der zu untersuchenden Ladung in Verbindung gesetzt, wobei er von einem der beiden Körper angezogen, von dem anderen abgestossen wird.

Die Stärke der Anziehung, resp. Abstossung hängt von der Dichtigkeit ab; es kann deshalb diese letztere dadurch gemessen werden, dass man an den beweglichen Körpern eine Gegenkraft wirken lässt, die mit wachsender Entfernung der Körper zunimmt. Da die Abstossung mit wachsender Entfernung abnimmt, so wird für jede Dichtigkeit eine Mittellage existiren, in welcher beide Kräfte, Abstossung und Gegenkraft, sich im Gleichgewichte befinden. Aus dieser Mittellage lässt sich die Dichtigkeit der wirkenden Elektricität ermitteln. Diese Messungsart ist also ganz analog derjenigen, welche bei Messung der Stromstärke angewendet wurde.

Wie wir sehen, ist auch hier die Messung der Elektricität auf die Messung der Wirkung begründet, und zwar ausschliesslich auf Messung der mechanischen Wirkung. Bis jetzt ist diese Methode die einzige geblieben, obwohl die Möglichkeit nicht ausgeschlossen ist, noch andere zu finden, z. B. die molecularen Aenderungen, welche ein Körper durch Elektrisirung erleidet, auf optischem Wege bestimmbar zu machen, und nicht unwahrscheinlich ist es, dass auf diesem Wege eine höhere Empfindlichkeit erzielt werden wird. Von grossem Vortheile würde es für die Messung der statischen Elektricität sein, wenn man die mechanische Wirkung der statischen Elektricität in ähnlicher Weise vervielfachen könnte, wie dieses bei den Galvanometern durch

Vermehrung der Drahtwindungen, die auf den Magnet wirken, geschieht. Für Erfinder liegt hier ein weites Feld lohnender Thätigkeit offen.

2. Die Elektroskope.

Wir unterscheiden die Elektroskope, d. h. solche Apparate, welche nur das Dasein von Elektricität und ungefähr den Grad der Dichtigkeit anzeigen, von den Elektrometern, welche zur genauen Messung dienen.

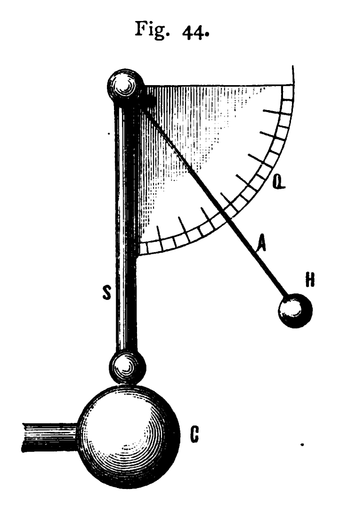
Fig. 43.

Das einfachste Elektroskop ist das Goldblatt-Elektroskop, das in Fig. 43 dargestellt ist. Auf den Hals einer Glaskugel, welche auf einem Fusse befestigt ist, ist eine Fassung angekittet. Diese Fassung kann durch einen Deckel mit Gewinde geschlossen werden. In diesem ist ein Stückchen Glasröhre befestigt, durch welches ein Draht führt, der bis in die Glaskugel hineinreicht. — Das äussere Ende des Drahtes trägt eine kleine Metallkugel; an dem inneren Ende sind zwei feine, gleich lange Goldblattstreifchen angeklebt. Berührt man das äussere Ende des Drahtes mit einem elektrisirten Körper, so theilt sich die Elektricität den beiden Goldblattstreifchen mit, diese stossen einander ab und zeigen so durch ihre Divergenz das Vorhandensein von Elektricität an. Um sich über die Art der untersuchten Elektricität Klarheit zu verschaffen. berührt man den Knopf des Elektroskopes,

während die Divergenz der Streifen noch vorhanden ist, mit einer geriebenen Siegellack-Stange. Wird dadurch die Divergenz vermehrt, so war die erstere Elektricität von gleicher Art mit der Elektricität der geriebenen Siegellack-Stange, d. h. negativ.

Eines anderen Elektroskopes bedient man sich, um bei den Elektrisir-Maschinen den ungefähren Grad der

Fig. 44.



Spannung zu ermitteln. Dieses Elektroskop, welches das Henley'sche Quadranten-Elektrometer heisst und nicht mit dem Thomson'schen Quadranten-Elektrometer verwechselt werden darf, besteht aus einer metallenen Säule *S* (Fig. 44), die vertical auf dem Conductor der Elektrisir-Maschine steht. An der Spitze trägt diese Säule ein kleines Scharnier, mittelst dessen sich ein leichtes Stäbchen in der Verticalebene bewegen kann. So lange keine Elek-

tricität vorhanden ist, hängt das Stäbchen, das an seinem Ende meistens eine kleine Hollundermark-Kugel *H* trägt, vertical herunter und liegt an der Säule an. Wird aber der Conductor elektrisch, so wird das Stäbchen abgestossen und bildet mit der Säule einen Winkel, dessen Grösse von der Dichtigkeit der wirkenden Elektricität abhängt. Zur Messung dieses Winkels ist eine Viertelkreis-Theilung *Q* auf Papier oder Elfenbein so an der Säule befestigt, dass der Mittelpunkt des Theilungskreises mit dem Drehpunkte des Stäbchens zusammenfällt.

Der Mangel dieser beiden Elektrometer ist ihre Unempfindlichkeit, der sie bei schwächeren Elektricitätsmengen unbrauchbar macht. Ausserdem ist es umständlich, sich jedesmal erst durch eine Probe über die Art der untersuchten Elektricität vergewissern zu müssen.

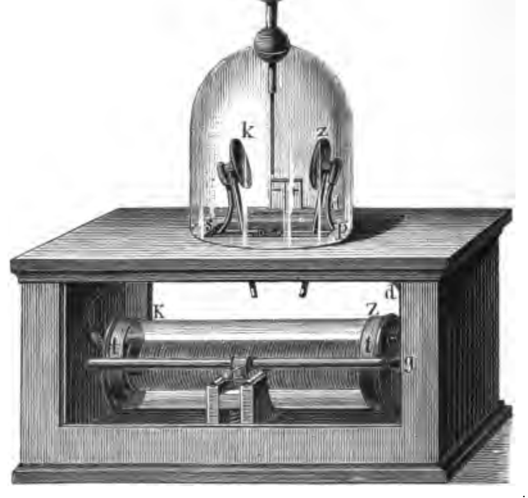
Von diesen Mängeln frei ist das Elektroskop von Behrends, das in Fig. 45 dargestellt ist. Der Haupttheil dieses Instrumentes ist eine Zamboni'sche Säule (*KZ*), welche in einem Kasten liegt. Dergleichen Zamboni'sche Säulen fertigt man in der Weise an, dass man aus Gold- und Silberplatten runde Scheibchen von etwa 2—3 Cm. Durchmesser ausschneidet und je ein Goldpapier- und ein Silberpapier-Scheibchen mit den metallischen Oberflächen aufeinander legt. Man vereinigt dann 1000—2000 solcher Paare zu einer Säule, indem man sie in einer Glasröhre aufschichtet und zusammenpresst. Hierbei muss man aber Acht haben, dass die Reihe Goldpapier-Silberpapier immer die gleiche bleibt, so dass beide stets mit einander abwechseln.

Bei dem Contacte des Zinnes des Silberpapieres mit dem Kupfer des Goldpapieres nehmen beide Metall-

belegungen verschiedene Elektricitäten an, und es wird bei dem Zinn negative, bei dem Kupfer positive Elektricität frei, so dass ein solches Scheibenpaar ein galvanisches Element vorstellt. Wenn nun auch die Spannung bei einem solchen Elemente sehr gering ist, so wird sie

Fig. 45.





doch bei einer Anzahl von 1000—2000 schon kräftig genug sein, um deutliche Wirkungen auszuüben.

Der Kasten, in welchem die Zamboni'sche Säule liegt, hat auf der oberen Seite einen Spalt, durch welchen die Poldrähte geführt sind. An diesen Poldrähten sitzen die Platten *k* und *z*. — Spalt und Polplatten werden durch eine Glasglocke bedeckt, welche oben durchbohrt ist und einem Drahte den Eintritt gestattet. Der Draht

endigt aussen in einem Knopf; an seinem Ende innerhalb der Glasglocke ist ein feines Streifchen Goldblatt angeklebt, das genau in der Mitte zwischen den beiden Platten *k* und *z* hängt. Durch Schrauben können die beiden Platten so eingestellt werden, dass das Goldblättchen genau in der Mitte zwischen beiden hängt. Um die Platten beliebig elektrisiren zu können, ist der Metallstab *tt* angebracht, welcher die Platten mit der Säule in Verbindung setzt.

Wird nun der Knopf mit einem elektrischen Körper berührt, so theilt sich die Elektricität dem Goldblättchen mit, und dieses wird von derjenigen Polplatte angezogen, welche die entgegengesetzte Elektricität hat. Man erkennt daher sofort aus dem Sinne des Ausschlages die Art der zu prüfenden Elektricität.

Zu höchster Empfindlichkeit ist dieses Instrument durch Hankel gebracht, welcher die Zamboni'sche Säule durch eine Batterie von kleinen Zink-Kupfer-Elementen ersetzt hat. Die Zink-Kupfer-Elemente bestehen aus zusammengelötheten Drahtstücken, die in reines Wasser tauchen. Die Anzahl derselben wechselt je nach der verlangten Empfindlichkeit und steigt bis zu 1000. Das Goldblättchen hängt in einem Messingkasten, dessen Rückwand von Glas ist und eine feine Theilung trägt. Die Beobachtung geschieht nicht mit dem blossen Auge, sondern durch ein Mikroskop.

3. Die Torsions-Elektrometer.

Die eben beschriebenen Instrumente können nur dazu dienen, die Anwesenheit von Elektricität erkennen

zu lassen; zu einer quantitativen Bestimmung sind sie jedoch nicht geeignet.

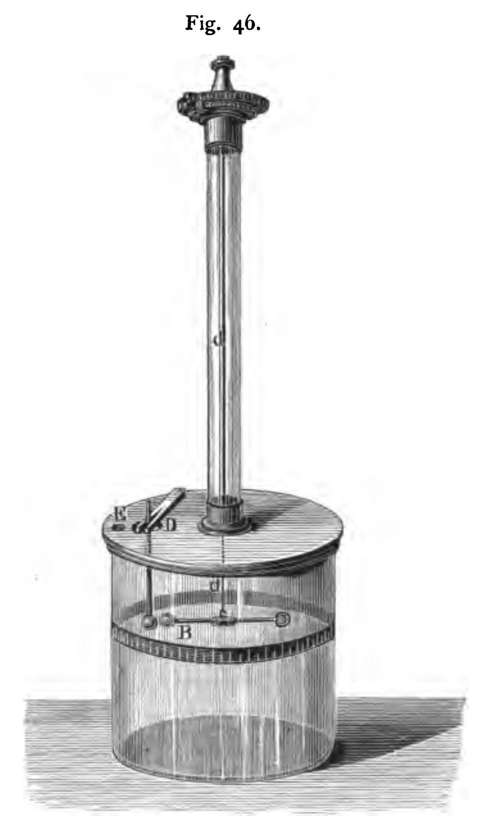
Die Nothwendigkeit solcher Massbestimmung der statischen Elektricität brachte Coulomb darauf, die Torsion zur Messung der Abstossung oder Anziehung zweier Elektricitätsmengen zu benutzen. Die Kraft eines tordirten Fadens oder Drahtes hängt, wie wir schon früher sahen, von der Grösse des Torsionswinkels ab und ist diesem proportional.

Auf diesem Verhalten der Torsion fussend, construirte Coulomb seine elektrische Drehwage und schuf damit ein Präcisions-Instrument für die Messungen der statischen Elektricität, mittelst welchem er die Gesetze der elektrischen Anziehung und Abstossung experimentell untersuchen konnte.

Die Drehwage (Fig. 46) besteht aus einem Glascylinder von 25 Cm. Höhe und 30 Cm. Durchmesser. Derselbe ist mit einer Glasscheibe bedeckt, welche in der Mitte durchbohrt ist und hier eine Fassung trägt, in welcher eine Glasröhre von 50 Cm. Länge und 2 Cm. Durchmesser eingekittet ist. Die Glasröhre trägt an ihrem oberen Ende eine in Grade getheilte, horizontale Messingscheibe, die in der Mitte durchbohrt ist. In der Bohrung dreht sich ein Messingknopf, an welchem der Aufhängefaden *d* befestigt ist. Wird der Knopf gedreht, so überträgt sich die Drehung auch auf den Aufhängefaden, der dann, wenn er der Drehung nicht folgen kann, tordirt wird. Um die Grösse der Drehung erkennen zu lassen, trägt der Knopf einen kleinen Zeiger, der sich an der Theilung der Messingscheibe vorbeibewegt und so die Ablesung des Drehungswinkels ermöglicht.

Eine zweite Theilung befindet sich in dem grossen Glascylinder, in welchem ringsherum, etwa in der Mitte,

Fig. 46.

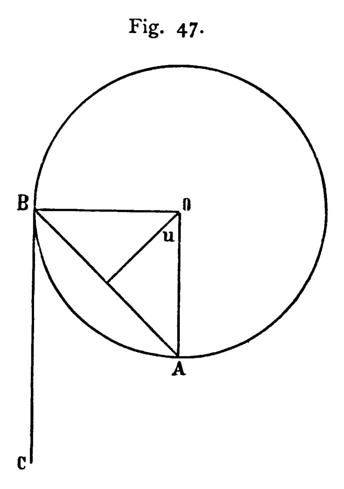


ein in 360 Theile getheilter Papierstreifen geklebt ist. An dem Aufhängedraht hängt horizontal ein leichter Wagebalken *B*, der aus einem dünnen Schellack- oder mit Schellack überzogenen Glasfaden hergestellt wird.

An dem einen Ende trägt er eine kleine vergoldete Hollundermark-Kugel, an dem anderen ein rundes verticales Glimmerscheibchen, das die Stellung des Wagebalkens an der Theilung markirt.

Nahe am Rande des Glasdeckels befindet sich in diesem eine zweite Durchbohrung, durch welche die Standkugel *D* eingelassen wird. Diese Standkugel ist, wie

Fig. 47.



die Kugel des Wagebalkens, eine vergoldete Hollundermark-Kugel und an Grösse genau dieser gleich. Sie ist an ein Schellackstäbchen geklebt, mittelst dessen sie in den Glascylinder eingesenkt und in der Höhe des Wagebalkens festgehalten werden kann. Das Schellackstäbchen hat einen vorspringenden Rand, mit welchem es auf dem Glasdeckel aufliegt. Wird nun die Standkugel, nachdem ihr eine Quantität Elektricität mitgetheilt, in die Drehwage eingesenkt, so wird bei der Berührung der beiden

Kugeln auch die Kugel des Wagebalkens elektrisirt und von der Standkugel abgestossen werden.

Ist die Kraft, mit welcher sich die beiden Kugeln in der Einheit der Entfernung abstossen, gleich P, so ist die Abstossung gleich dieser Kraft dividirt durch das Quadrat der Entfernung. Diese Entfernung ist aber, bei einer Ablenkung des Wagebalkens um u Grad von dem Orte der Standkugel (Fig. 47) gleich

$$2\,R \sin \frac{u}{2}$$

wenn R die halbe Länge des Wagebalkens ist. An der Drehung des Wagebalkens nimmt nur diejenige Componente Theil, welche senkrecht auf dem Wagebalken, also parallel CB, wirkt. Dieselbe ist gleich

$$\frac{P}{4\,R^2 \sin^2 \frac{u}{2}} \cos CBA$$

oder, da $CBA = \frac{u}{2}$, gleich

$$\frac{P}{4\,R^2 \sin^2 \frac{u}{2}} \cos \frac{u}{2}\,.$$

Da diese Kraft an dem Hebelarm von der Länge R wirkt, so ist das Drehungsmoment gleich

$$\frac{P}{4\,R^2 \sin^2 \frac{u}{2}} \cdot R \cdot \cos \frac{u}{2} = \frac{P}{4\,R \sin^2 \frac{u}{2}} \cos \frac{u}{2}$$

Dieser Kraft ist die des tordirten Fadens gleich. Dieselbe ist proportional dem Torsionswinkel. War nun bei einer Torsion T die Ablenkung u, so beträgt der Torsionswinkel $T + u$, die Gleichung der beiden Kräfte wird daher

$$\frac{P}{4\,R}\,\frac{\cos\frac{u}{2}}{\sin^2\frac{u}{2}} = M\,(T+u)$$

oder

$$P = 4\,R\,M\,(T+u)\,\sin\frac{u}{2}\,\operatorname{tg}\frac{u}{2}.$$

Um mittelst der Drehwage die Spannungen zweier elektrisirter Körper mit einander zu vergleichen, ertheilt man zunächst der Kugel des Wagebalkens eine Ladung, die mit E bezeichnet werden soll. Man bringt darauf die Standkugel mit dem einen Körper in Berührung, und setzt sie, nachdem man ihr so die Ladung e_1, welche der Spannung des elektrisirten Körpers proportional ist, ertheilt hat, in die Drehwage ein. Damit jedoch eine Berührung der Standkugel und der Kugel des Wagebalkens vermieden wird, giebt man der letzteren vorher eine kleine Drehung.

Nach dem Vorhergehenden ist die Abstossungskraft der beiden Kugeln für die Entfernungs-Einheit gleich

$$E\,e_1 = 4\,R\,M\,(T+u)\,\sin\frac{u}{2}\,\operatorname{tg}\frac{u}{2}$$

Verfährt man mit dem zweiten elektrisirten Körper in gleicher Weise, so erhält man für die Ablenkungen T^1 und u^1

$$E\,e_2 = 4\,R\,M\,(T^1+u^1)\,\sin\frac{u^1}{2}\,\operatorname{tg}\frac{u^1}{2}$$

wo e_2 die Ladung der Standkugel bedeutet, welche ihr dieser Körper mittheilt. Es ist dann

$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{(T^1+u^1)\,\sin\frac{u^1}{2}\,\operatorname{tg}\frac{u^1}{2}}{(T+u)\,\sin\frac{u}{2}\,\operatorname{tg}\frac{u}{2}}$$

oder wenn man $u = u^1$ macht, die Elektricitäten also bei gleichen Ablenkungen vergleicht

$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{T^1 + u}{T + u}$$

Giebt man dem Wagebalken schon von vornherein die Ablenkung u, so wird

$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{T^1}{T} \quad .$$

Das Verhältniss der Torsionen ergiebt dann unmittelbar das der beiden Elektricitäten e_1 und e_2.

Die Ladung E der beweglichen Kugel brauchen wir nicht zu kennen, da dieselbe im Vergleiche der beiden Elektricitätsmengen e_1 und e_2 fortfällt. Dabei ist allerdings vorausgesetzt, dass das E während der Dauer der Messungen sich nicht ändert. Da nun ein Verlust an Elektricität bei der beweglichen Kugel aber nicht zu vermeiden ist, so müssen die Vergleiche der beiden Wirkungen in möglichst kurzer Zeit geschehen.

So sehr sich die Torsionswage in der angegebenen Form durch Einfachheit und Genauigkeit empfiehlt, so leidet sie doch an dem Fehler, für kleinere Elektricitätsmengen zu unempfindlich zu sein. Um diesem Uebelstande abzuhelfen, ersetzt Dellmann die Standkugel durch einen Bügel, welcher auf die ganze Länge des Wagebalkens einwirkt und so eine weit kräftigere Wirkung hervorbringt als die Standkugel, die nur in einem Punkte am Wagebalken angreift.

Diese Aenderung hat Kohlrausch bei der Construction seines Torsions-Elektrometers benützt, das in Fig. 48 dargestellt ist.

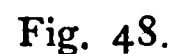
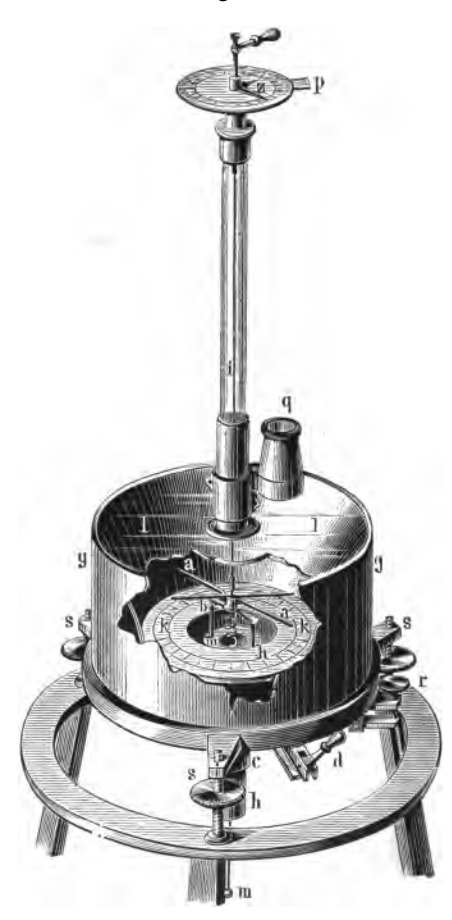


Fig. 48.



Auf einer Grundplatte, die durch Stellschrauben horizontal gestellt werden kann, steht der messingene Cylinder *g*, der durch eine starke Glasplatte oben ge-

schlossen ist. Auf dieser Glasplatte steht über einer Durchbohrung die Glasröhre *i*, welche einen Torsionskreis und die Aufhängung des Wagebalkens trägt. Der Aufhängefaden ist ein feiner Glasfaden, der Wagebalken ein Stückchen feiner Aluminium- oder Silberdraht.

Der Bügel, welcher die Standkugel vertritt, ist ebenfalls aus Aluminium oder Silber. Er ist mit zwei Schellackfüsschen auf die Glasröhre *m* gekittet, welche durch einen aussen angebrachten Hebel ein wenig gesenkt oder gehoben werden kann.

Durch diese Senkung oder Hebung des Bügels wird der Wagebalken, welcher im Zustande der Ruhe in der Ausbiegung des Bügels und mit der einen Hälfte an der rechten und der anderen an der linken Seite desselben anliegt, frei gemacht oder arretirt.

In dieser Glasröhre bewegt sich eine zweite, welche die Zuleitung zu dem Bügel in sich aufnimmt. Durch Hebung dieser zweiten Röhre wird die Zuleitung mittelst einer feinen Feder in Contact mit dem Bügel gebracht, durch Senkung derselben wird der Bügel isolirt.

Unter dem Bügel ist eine horizontale Kreistheilung angebracht, deren Mittelpunkt mit der Drehungsaxe des Wagebalkens zusammenfällt.

Will man mit diesem Instrumente messen, so stellt man zunächst den Wagebalken senkrecht zum Bügel, hebt diesen letzteren, so dass er in leitende Verbindung mit dem Wagebalken tritt, und bringt darauf durch Hebung der Glasröhre den Bügel in Contact mit der Elektricitätsquelle. Die Elektricität verbreitet sich nun über Bügel und Wagebalken. Durch Senken der Röhren hebt man erst den Contact mit der Elektricitätsquelle

und dann die Verbindung zwischen Bügel und Wagebalken auf. Darauf stellt man den Torsionskreis auf Null. Bei Abwesenheit von Elektricität lag bei dieser Einstellung der Wagebalken an dem Bügel an. Jetzt aber, wo die Abstossung einwirkt, wird sich eine Ablenkung des Wagebalkens zeigen, deren Grösse man an dem horizontalen Theilkreis unter dem Wagebalken ablesen kann.

Während nun bei der Drehwage die Elektricitätsmengen proportional der Torsion gesetzt werden konnten, weil wir ohne erhebliche Ungenauigkeit die Wirkung der beiden Kugeln als von ihren Mittelpunkten ausgehend betrachten mussten, ist bei dem eben beschriebenen Apparate der Zusammenhang zwischen der Elektricitätsmenge und der Grösse der Abstossung nicht so einfach, weil die Elektricität über den ganzen Bügel und Wagebalken hin und in einer unbekannten Weise vertheilt ist. Wollten wir daher die abstossende Wirkung zwischen Wagebalken und Bügel gleich der Wirkung zweier in zwei Punkte concentrirt gedachten Elektricitätsmengen ersetzen, so würden wir nicht wissen, wohin wir die beiden Punkte zu legen haben, und könnten somit das einfache Abstossungsgesetz hier nicht zur Anwendung bringen.

Um diese Schwierigkeit zu umgehen, bestimmt man die zu messende Spannung nicht aus dem veränderlichen Ablenkungswinkel, sondern aus dem Torsionswinkel, welcher erforderlich ist, um die Ablenkung auf einer festen Höhe, z. B. 10 oder 20 Grad zu halten.

Alsdann ist die Abstossung gleich der tordirenden Kraft des Glasfadens, die selbst proportional dem Torsionswinkel ist. Die Abstossung wird aber andererseits

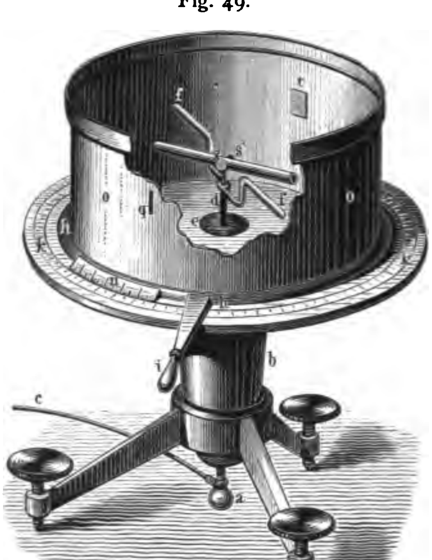
proportional dem Quadrate der Elektricitätsmenge, welche dem Bügel und dem Wagebalken mitgetheilt ist, sein. Ist nämlich diese Elektricitätsmenge gleich e und nimmt der Bügel davon den Theil ae und der Wagebalken den Theil $(1-a)\,e$ auf, so wird die Abstossung, welche proportional dem Producte der beiden auf Bügel und Wagebalken befindlichen Elektricitätsmengen ist, gleich $a(1-a)e^2$ oder, da a nicht von der Menge der Elektricität, sondern von der Form des Bügels und des Wagebalkens abhängt, proportional e^2 sein. Das Quantum e ist aber proportional der Spannung des Körpers, dessen Elektricität untersucht werden soll. Hieraus folgt also: die Spannung eines mit dem Torsions-Elektrometer untersuchten elektrischen Körper ist proportional der Wurzel des Torsionswinkels, für welchen der Wagebalken eine feste Ablenkung, z. B. 10 Grad erhält. Zwei Spannungen verhalten sich also, wie die Wurzeln ihrer Ablenkungen.

Es bedarf übrigens nicht einmal einer Zurückführung des Wagebalkens auf feste Ablenkung: man kann nämlich erfahrungsmässig für jedes Instrument feststellen, welcher Torsionswinkel einer gegebenen Ablenkung entspricht. Fertigt man daher eine Tabelle dieser zusammenhängenden Werthe an, so bedarf es nur der Beobachtung der anfänglichen Ablenkung, um die Spannung zu messen, wodurch die Messung erheblich vereinfacht und erleichtert und zugleich, da wegen der kürzeren Dauer Elektricitätsverluste besser vermieden werden, auch genauer wird.

4. Das Sinus-Elektrometer.

Wir verdanken Kohlrausch noch ein zweites Elektrometer, das sich ebenso sehr durch bequeme Form wie durch leichte Handhabung auszeichnet. Es ist dies

Fig. 49.



das Sinus-Elektrometer, ein Verwandter der Sinus-Bussole, da es wie diese die abstossende Kraft, welche auf eine Magnetnadel wirkt, durch die wachsende Wirkung des Erdmagnetismus auf die Nadel misst.

Das Instrument ist in Fig. 49 dargestellt.

In einem Dreifuss mit Stellschrauben steht die messingene Röhre *b*, in welche die Messingstange *c* mit

Schellack sorgfältig isolirt eingekittet ist. Auf dieser Stange steckt mittelst eines Conus der Stift *d*, welcher den Bügel *ff* trägt, und auf dessen Spitze eine leichte Magnetnadel spielt. Wird der Bügel und die Magnetnadel durch die Zuleitung *c* elektrisirt, so wird die Magnetnadel abgestossen. Befand sich nun die Nadel bei Ruhelage im magnetischen Meridian, so wird sie bei einer Ablenkung v durch die Wirkung des Erdmagnetismus ein Drehungsmoment erfahren, das proportional dem Sinus von v ist. Je grösser v ist, desto grösser wird auch die Einwirkung des Erdmagnetismus, welche, wie leicht zu sehen, der Wirkung der Abstossung entgegengesetzt ist.

Es wird also eine Lage der Nadel existiren, in welcher die Wirkung der Abstossung und des Erdmagnetismus einander aufheben.

Da aber die Abstossung nicht nur von der Spannung, sondern auch von der Stellung des Bügels zur Nadel abhängt, so muss, damit der Einfluss dieser letzteren ausgeschlossen bleibt, dafür Sorge getragen werden, dass die Stellung des Bügels zur Nadel bei der Beobachtung stets dieselbe ist.

Zu diesem Zwecke ist der Bügel drehbar gemacht, so dass er der Drehung der Nadel folgen kann.

Durch diese Drehung wird allerdings die Magnetnadel noch weiter abgelenkt, doch wird der Abstand zwischen Bügel und Nadel, wenn die zu messende Spannung nicht zu gross ist, wegen der wachsenden Wirkung des Erdmagnetismus kleiner und kleiner werden, und endlich für die Lage, bei welcher die Wirkung des Erdmagnetismus der Abstossung gleich ist, ganz ver-

schwinden. Alsdann hat die Nadel zu dem Bügel die feste Stellung, bei welcher die Wirkung der Abstossung gemessen werden soll.

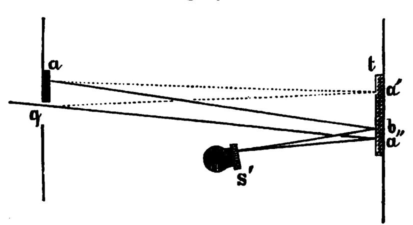
Kohlrausch hat nun an dem Apparate eine kleine ingeniöse Vorrichtung angebracht, mittelst welcher man erkennen kann, ob Bügel und Nadel sich in der bestimmten Lage zu einander befinden.

Zu diesem Zwecke ist auf die Platte, welche sich mit dem Bügel durch den Griff *i* drehen lässt, der Cylindermantel *o* aufgesetzt, der sich sowohl für sich in dem Rande *h*, als auch mit der Bodenplatte zusammen drehen kann. Dieser Cylindermantel ist durch einen Glasdeckel geschlossen und bildet so zugleich ein Schutzgehäuse für Nadel und Bügel. In halber Höhe des Mantels befindet sich ein verticaler Schlitz und ihm diametral gegenüber an der inneren Wand ein kleiner Spiegel *t*.

Die Magnetnadel trägt in der Mitte zu beiden Seiten zwei kleine Stahlspiegelchen *s s'*, von denen *s'* ein wenig zur Verticale geneigt ist, wie das aus Fig. 50 zu sehen ist. Sieht man nun durch den Schlitz, so erblickt man in dem Spiegel *t* das Bild eines verticalen Striches, der über dem Schlitze auf weissem Grunde angebracht ist. Steht ferner der Spiegel *s'* senkrecht zu der Visirlinie, so wird ein zweites Bild des Markirstriches sich mit dem ersten decken. Dieses zweite Bild entsteht dadurch, dass das Bild des Striches von dem Spiegel *t* nach dem Spiegel *s'*, von diesem zurück nach *t* und von hier aus nach dem Schlitz reflectirt wird. Aus dem Zusammenrücken der beiden Bilder ersieht man daher, dass der Spiegel *s'* und damit auch die Magnetnadel in die Stellung senkrecht zur Visirlinie gegangen sind.

Mit der festen Lage zur Visirlinie nimmt die Nadel auch eine solche zu dem Bügel ein, da man den Cylindermantel und den Bügel nach vorhergegangener Einstellung fest verbunden hat. Diese Einstellung muss jedesmal vor Beginn des Versuches vorgenommen werden. Zu diesem Zwecke dreht man den Cylindermantel bei festgehaltener Grundplatte so lange, bis die beiden Spiegelbilder zusammenfallen. Die Nadel und den Bügel hatte man schon vorher so eingestellt, dass die erstere im magnetischen Meridian stand und den Bügel nahezu

Fig. 50.



berührte. Ist die Einstellung des Mantels erreicht, so wird er durch eine besondere Anzugschraube mit der Grundplatte unverrückbar verbunden.

An der Grundplatte ist ein Nonius befestigt, welcher sich an einer horizontalen Kreistheilung bewegt und so die Bestimmung des Winkels gestattet, für welchen Bügel und elektrisirte Magnetnadel wieder die Lage annehmen, welche ihnen vor der Elektrisirung gegeben wurde.

Ist dieser Winkel v, so ist die Wirkung des Erdmagnetismus auf die Nadel proportional sin v. Die Abstossung wird ferner proportional dem Quadrate der

Spannung sein, wie das aus dem früher Gesagten hervorgeht. Zwei mit dem Sinus-Elektrometer gemessene Spannungen, denen die respectiven Winkel v und v' entsprechen, werden sich also verhalten

$$\frac{e'}{e} = \frac{\sqrt{\sin v'}}{\sqrt{\sin v}}$$

Die feste Lage zwischen Bügel und Nadel braucht durchaus nicht immer die im Vorigen angegebene zu sein, bei welcher sich Nadel und Bügel fast berührten. Vielmehr kann man jede beliebige Lage der beiden Theile zu einander als feste annehmen, was besonders da von Wichtigkeit ist, wo es sich um grössere Spannungen handelt, für welche die Abstossung bei naher Lage zu gross werden würde.

Man kann aber auch noch weiter gehen und Spannungen mit einander vergleichen, welche unter verschiedenen Lagen von Bügel und Nadel bestimmt worden sind, wodurch Spannungen sehr verschiedener Grade mit einander verglichen werden können.

»Bedingt nämlich (Wüllner's Physik, Bd. IV) bei dem Winkel α eine Elektricitätsmenge die Ablenkung v, bei dem Winkel β die Ablenkung u,. so ist der Quotient

$$\sqrt{\frac{\sin v}{\sin u}}$$

constant, welches auch die Elektricitätsmenge e sein mag. Denn bewirkt eine andere Elektricitätsmenge e^1 bei dem Winkel α die Ablenkung v^1, bei dem Winkel β aber u^1, so ist nach dem Vorigen

$$e : e^1 = \sqrt{\sin v} : \sqrt{\sin v^1}$$
$$e : e^1 = \sqrt{\sin u} : \sqrt{\sin u^1}$$

also $$\sqrt{\frac{\sin v}{\sin u}} = \sqrt{\frac{\sin v^1}{\sin u^1}} = m.$$

Dieser Quotient m lässt sich nun für eine Reihe von Winkeln durch Versuche finden, indem man die Ablenkungen v, u, w beobachtet, welche eine und dieselbe Elektricitätsmenge hervorbringt, wenn Bügel und Nadel die Winkel α, β, γ mit einander bilden. Hat man diesen Quotienten nun z. B. für Winkel α und β bestimmt und beobachtet bei einem Winkel α durch eine Elektricitätsmenge e die Ablenkung v, durch eine andere Elektricitätsmenge E bei dem Winkel β die Ablenkung u, so weiss man zunächst, dass die Elektricitätsmenge e bei dem Winkel β die Ablenkung u^1 hervorgebracht hätte, so dass

$$\sqrt{\sin u^1} = \frac{\sqrt{\sin v}}{m}$$

und daraus ergiebt sich, dass

$$e : E = \frac{\sqrt{\sin v}}{m} : \sqrt{\sin u}$$

oder

$$E = e \,.\, m \frac{\sqrt{\sin u}}{\sqrt{\sin v}}$$

Setzt man nun jene Elektricitätsmenge als Einheit, welche bei dem Winkel α zwischen Arm und Nadel $= 90^0$ macht, so ist immer

$$e = \sqrt{\sin v}$$

und

$$E = m \,.\, \sqrt{\sin u}.$$

Es wird also die bei dem Winkel β zwischen Bügel und Nadel gemessene Elektricitätsmenge durch die ange-

nommene Einheit ausgedrückt, wenn man die Quadratwurzel aus dem Sinus des beobachteten Ablenkungswinkels mit dem für den Winkel β gefundenen Factor m multiplicirt.

Eine fernere Erweiterung im Gebrauche des Sinus-Elektrometers wird dadurch erreicht, das Nadeln von verschieden starkem magnetischen Momente angewendet werden. Die Angaben derselben werden dadurch sehr leicht vergleichbar, dass man sie bei der Anwendung derselben Elektricitätsquelle miteinander vergleicht. Indem man so Nadeln mit sehr grossem und solche mit sehr kleinem Momente verwendet, kann man Elektricitäten von sehr verschiedener Stärke miteinander vergleichen.«

5. Das Quadranten-Elektrometer von Thomson.

Die bisher beschriebenen Instrumente zur Messung der statischen Spannung sind nur da geeignet, wo die Spannung eine verhältnissmässig hohe ist, während sie für schwächere Spannungen, wie sie z. B. an der galvanischen Kette auftreten, viel zu unempfindlich sind. Diese Lücke wird nun durch Thomson's Quadranten-Elektrometer ausgefüllt, dessen hohe Empfindlichkeit und Genauigkeit das Instrument zu einem unentbehrlichen Mess-Instrument der Elektrik gemacht haben.

Das Elektrometer, von welchem Fig. 51 eine perspectivische und Fig. 52 eine schematische Ansicht giebt, besteht aus einem cylindrischen Glasgefäss, das oben offen, unten durch einen halbkugelförmigen Boden geschlossen ist. Es ist zur Hälfte innen und aussen mit Stanniol beklebt und bildet so eine Leydener Flasche, die

in einem soliden Gestell von Metall, das mit Stellschrauben versehen ist, ruht.

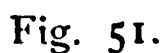
Ein metallener Deckel ist durch Schrauben an das Gestell befestigt und liegt auf dem gut abgeschliffenen Rande des Glasgefässes auf.

Auf dem Deckel steht in der Mitte eine metallene Trommel, welche die Zuleitungen trägt und die Aufhängevorrichtung umhüllt.

Unter dem Deckel sind durch vier gut isolirende Glassäulen die vier Quadranten befestigt, welche mit den zu vergleichenden Elektricitäten in Verbindung gesetzt werden. — Diese Quadranten bilden zusammen einen oben und unten geschlossenen flachen Metallcylinder von etwa 5 Cm. Durchmesser und 1 Cm. Höhe, welcher durch zwei Schnitte, die durch den Mittelpunkt gehen und rechtwinkelig zu einander sind, in vier Quadranten getheilt wird, welche durch die entstandenen Zwischenräume von einander isolirt sind. Durch Drähte sind dann die je gegenüberliegenden leitend mit einander verbunden, so dass die Ladung des einen Quadranten sich auch dem gegenüberliegenden mittheilt. Es entstehen so zwei Elektroden, von denen jede mit einer der beiden Klemmschrauben *l m* auf der Trommel in Verbindung steht.

Innerhalb des von den Quadranten umschlossenen Hohlraumes schwebt an einem Aufhängefaden eine horizontale Nadel *u*, welche aus dem allerdünnsten Aluminiumblech geschnitten ist und die Form einer Lemniscate hat, wie die Skizze in Fig. 52 es darstellt. Von der Mitte der Nadel hängt ein feiner Platindraht herab, der ein kleines Platingewicht trägt. Derselbe taucht in die Schwefelsäure, welche bis zu einem Drittel das Glas-

gefäss anfüllt. Diese Schwefelsäure hat den doppelten Zweck, den Hohlraum des Glasgefässes trocken zu erhalten und eine leitende Verbindung zwischen der inneren


Fig. 51.



Belegung des Glasgefässes und der Nadel herzustellen. — Mit der Nadel ist ein kleiner Spiegel zur Spiegel-Ablesung verbunden, welcher sich über dem Deckel innerhalb der Trommel befindet, und das ganze System ist an einem Coconfaden an dem Arme des Säulchens *q*

aufgehängt. Eine Schutzröhre, welche an dem Deckel befestigt ist und bis nahe auf das Niveau der Schwefelsäure hinabhängt, umgiebt den Aufhängefaden und den

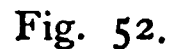
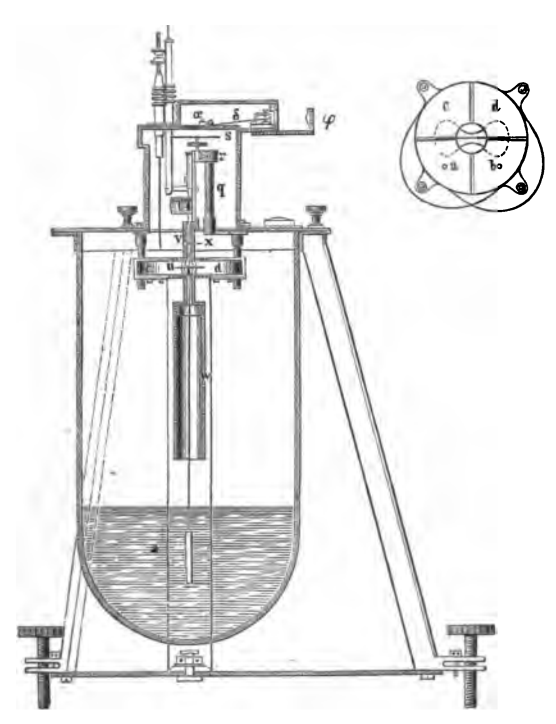


Fig. 52.



Platindraht. Für die Nadel sind zwei Ausschnitte angebracht, die ihr genügenden Spielraum gewähren.

An dem Spiegel ist ein kleines leichtes Magnetchen befestigt, das durch einen Hufeisenmagnet, der sich an der Aussenseite des Glasgefässes befindet, angezogen

und in einer solchen Lage festgehalten wird, dass die mit ihm festverbundene Nadel genau in der Mitte der Quadrantenpaare liegt, während bei Ablenkung der Nadel die Directionskraft des Magnetes sich als Gegenkraft geltend macht. Auf der Trommel liegt ein weiterer Apparat, welcher den Zweck hat, erkennen zu lassen, ob die Ladung der Leydener Flasche constant geblieben ist oder sich verändert hat.

Auf der Säule *q*, welche die Aufhängung trägt, ist ein kreisrundes Scheibchen *s* befestigt, welches in leitender Verbindung mit der inneren Belegung des Glasgefässes steht. Ueber dieser Scheibe ist ein Ausschnitt in dem Deckel angebracht, in welchem ein anderes Scheibchen von Aluminiumblech schwebt. Dasselbe ist an dem kürzeren Arm eines ungleicharmigen Hebels befestigt, der durch einen ausgespannten Platindraht gehalten wird. Der Draht ist etwas tordirt, so dass das Hebelende mit dem Scheibchen gehoben ist, wenn keine Anziehung durch *s* stattfindet. Der andere, längere Arm des Hebels endigt in einer kleinen Gabel, welche ein horizontal ausgespanntes feines Haar trägt, welches sich über einer festen weissen Scheibe hin bewegt. Vor dem Haar liegt ein Fadenkreuz mit Lupe, so dass die Einstellung des Hebels auf das Genaueste bestimmt werden kann.

Wird nun die innere Belegung und damit das Scheibchen *s* elektrisch, so wird der Hebel angezogen und markirt durch seine Einstellung das richtige oder unrichtige Mass der Ladung.

Um dieses richtige Mass zu erhalten und aufrecht zu halten, hat Thomson an seinem Elektrometer eine

kleine geistreiche Vorrichtung angebracht, mittelst welcher die Ladung des Glasgefässes beliebig verstärkt und geschwächt werden kann.

Eine Skizze dieses Apparates, welchen Thomson den Auffüller (replenisher) nennt, ist in Fig. 53 gegeben, welche einen Querschnitt desselben darstellt.

Innerhalb einer kleinen Trommel, welche durch zwei messingene, von einander isolirte Halbcylinder M und N gebildet wird, drehen sich die beiden Plättchen u, welche isolirt an einer Axe sitzen. Zwei Federn t und t', welche von allen anderen Theilen isolirt, unter sich aber verbunden sind, berühren die Platten, wenn dieselben in die Stellung, in welcher die Figur sie darstellt, gebracht werden. Zwei weitere Contactfedern s und s' sind an den Halbcylindern angebracht, wodurch eine leitende Verbindung zwischen den Platten $u\,u$ und den Halbcylindern hergestellt werden kann. Die Halbcylinder stehen mit der inneren, resp. äusseren Belegung in Verbindung. Liegen nun die Platten $u\,u$ an den Federn t und t' an, so sind sie leitend miteinander verbunden, und es werden auf ihnen durch Influenz von den Halbcylindern Elektricitäten entgegengesetzter Art erregt. Dreht man nun die Plättchen, so wird die Verbindung zwischen ihnen aufgehoben; sie bleiben also mit entgegengesetzten Elektricitäten geladen. Durch weitere Drehung kommen sie mit den Federn s und s' in Contact und geben ihre Elektricität an die Halbcylinder und somit an die Belegungen ab.

Fig. 35.

Je nach dem Sinne der Drehung werden die Ladungen der Belegungen verstärkt oder geschwächt werden, so dass man es ganz in der Hand hat, das richtige Mass der Ladung zu erhalten.

Um das Elektrometer zu gebrauchen, giebt man der inneren Belegung mittelst der Elektrode P die entsprechende Ladung. Sind die Quadranten nicht elektrisch, so bleibt die Nadel in ihrer Ruhelage; sobald aber das eine Quadrantenpaar eine Ladung erhält, während das andere unelektrisch bleibt oder seine Ladung kleiner oder entgegengesetzt ist, wird die Nadel je nach der Art der Ladung von dem ersten Quadrantenpaare angezogen oder abgestossen. Der Spiegel gestattet dann, die Grösse der Ablenkung mittelst Fernrohr und Scala zu messen.

Da die hier in Betracht kommenden Ablenkungen sehr gering sind und höchstens nur wenige Grade betragen, so kann man die ablenkende Kraft der Ablenkung proportional setzen. Hierbei ist jedoch vorausgesetzt, dass die zu messenden Elektricitäten verhältnissmässig schwach sind. Bei stärkeren Ladungen und grösseren Ablenkungen tritt mit der grösseren Ablenkung eine Veränderung der Vertheilung der Elektricität auf der Nadel ein, welche die Proportionalität zwischen Ablenkung und Ladung stört.

Als eine Eigenthümlichkeit des Instrumentes muss noch Folgendes bemerkt werden. Leitet man das eine Quadrantenpaar zur Erde ab, wodurch es durchaus elektricitätsfrei wird, und ertheilt dem anderen Paare nacheinander gleiche, aber entgegengesetzte Ladungen, so werden die Ausschläge in der Grösse differiren, die mit der Nadel ungleichnamige Ladung wird eine etwas

grössere Ablenkung bewirken als die gleichnamige. Dieses Verhalten hat seinen Grund darin, dass die auf die Nadel wirkende Kraft nicht ganz genau proportional den Elektricitäten der Quadranten ist; auf dasselbe muss daher bei Vergleichung von Elektricitätsgrössen entgegengesetzter Art Rücksicht genommen werden.

Die Fähigkeit des Quadranten-Elektrometers, äusserst geringe Ladungen zu messen, macht es besonders geeignet, die Spannungs-Erscheinungen im galvanischen Strome, welche gegenüber den Spannungen der statischen Elektricität sehr klein sind, zu messen. Hierdurch wird das Elektrometer zu einem brauchbaren Mess-Instrumente für die elektrischen Grössen, deren Messung jetzt nicht mehr nothwendig auf Stromstärke-Messung zurückgeführt werden muss, sondern für welche nun auch die Spannung einen geeigneten und für manche Zwecke ganz besonders geeigneten Factor der Bestimmung abgiebt.

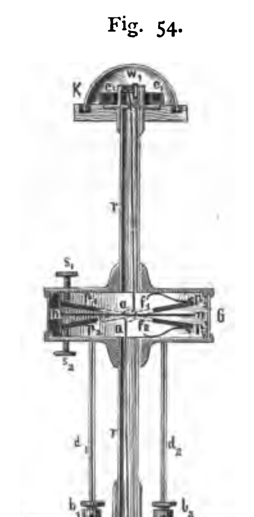
6. Das Contrafilar-Elektrometer

Wir haben früher bei der bifilaren Aufhängung gesehen, wie es möglich war, kleine Hebungen durch horizontale Ablenkungen bemerkbar zu machen. — Das Gleiche kann man durch eine andere Aufhängung erreichen, welche im Gegensatz zu der bifilaren die Contrafilar-Suspension genannt werden soll. — Fig. 56 giebt ein Schema dieser Aufhängungsart.

An zwei, in verschiedenen Verticalen liegenden Punkten sind zwei Fäden befestigt, deren andere Enden an zwei von der Mitte gleichweit entfernte Punkte des schwingenden Körpers führen. Die Länge der Fäden

ist so abgepasst, dass der Körper eine Neigung zur Horizontalen hat. Wird nun das tiefer liegende Ende desselben etwas gehoben, das höher liegende niedergedrückt, erhält also der Körper eine Drehung um die zur Ebene der Faden senkrechte Axe, so wird er eine neue Gleichgewichtslage einnehmen, wobei er sich um die Axe dreht, welche die Aufhängepunkte verbindet. Diese Drehung wird von der Länge der Faden und der Entfernung der Befestigungspunkte auf dem schwingenden Körper abhängen.

Fig. 54.



Durch eine Drehung um eine horizontale Axe wird also eine Drehung um eine verticale Axe bewirkt, und es kann durch zweckmässige Wahl der bestimmenden Constanten das Verhältniss der beiden Drehungen zu einander so gestaltet werden, dass schon eine schwache horizontale Drehung eine bedeutende verticale hervorruft.

Durch die Art der Aufhängung ist aber auch bewirkt, dass der schwingende Körper bis zu einem beliebigen Grade äquilibrirt ist. Demnach wird, wenn die Annäherung an das Gleichgewicht eine ziemlich bedeutende ist, schon eine geringe Kraft eine erhebliche horizontale Drehung und somit eine noch grössere verticale Ablenkung erzeugen.

Diese Aufhängung, welche wir dem leider zu früh verstorbenen Zöllner verdanken, ist in dem Contrafilar-

Elektrometer angewendet worden, von welchem eine Darstellung in Fig. 54 gegeben ist.

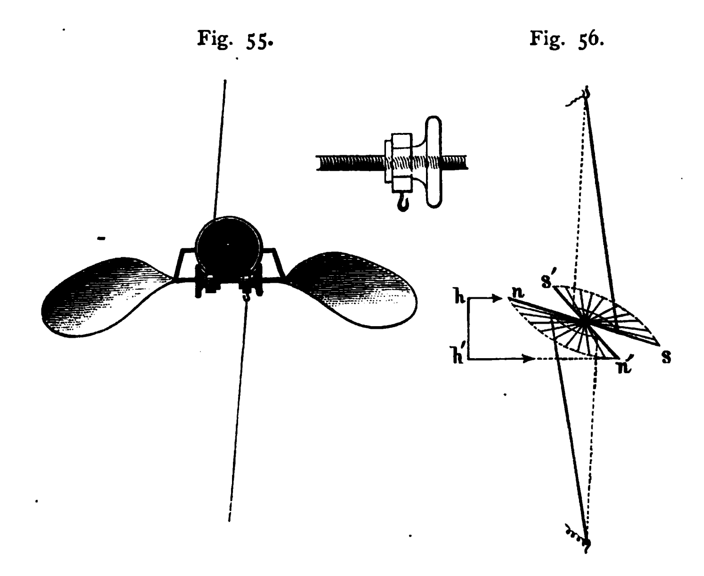
Auf einer Grundplatte steht die Glasröhre *r*, welche das Gehäuse *G* trägt. — Dasselbe besteht aus einem kurzen, weiten Glascylinder, welcher durch Hartgummiplatten geschlossen ist. Diese letzteren haben centrale Fassungen, von denen die untere auf der Röhre *r* aufsitzt, die obere aber eine andere Glasröhre aufnimmt, welche von der gleichen Länge wie die erstere ist, und oben das Kopfstück *K* trägt. Dieses Kopfstück besteht aus einer runden Platte, welche auf der Röhre *r* befestigt ist. Dieselbe trägt die Suspensionsvorrichtung für den oberen Faden und ein concentrisches, ringförmiges Gefäss, welches zur Aufnahme von Chlorcalcium dient. Eine kleine Glasglocke schliesst das Ganze gegen die äussere Luft ab.

Das Chlorcalcium-Gefäss dient zur Trockenhaltung der Luft im Elektrometer; seine Stellung im höchsten Theile desselben hat es aus dem Grunde erhalten, weil die trockene Luft specifisch schwerer als feuchte ist, also bei Anwesenheit von feuchter Luft sofort eine Circulation der Luft im Elektrometer stattfinden wird, welche die Austrocknung befördert, indem die getrocknete Luft herabsinkt, die feuchte Luft aber aufsteigt und an das Chlorcalcium gebracht wird.

Der Cylinder enthält zwei Plattenpaare, welche so angeordnet sind, dass die obere, vordere und untere, hintere Platte einerseits und die untere, vordere und die obere, hintere andererseits zu einander gehören und miteinander leitend verbunden sind. Diese Plattenpaare lassen sich scheerenartig einander nähern und von einander

entfernen, zu welchem Zwecke zwei Hartgummischrauben s_1 s_2 durch die Platten des Cylinders geführt sind, durch deren Drehung die Platten einander genähert werden. Zwei Metallfedern, welche zugleich als Zuleitungen zu den Platten dienen, besorgen die entgegengesetzten Bewegungen, wenn die Schrauben nachgelassen werden.

Fig. 55. Fig. 56.

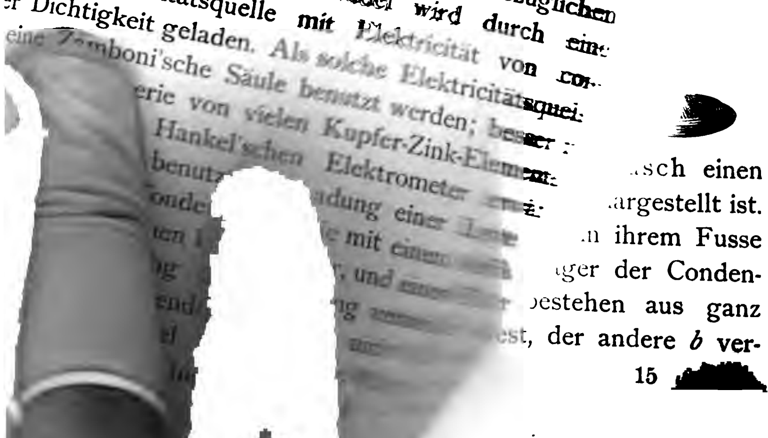


Zwischen diesen Platten hängt nun die horizontale Nadel, deren Einzelheiten in Fig. 55 dargestellt sind. An einem Draht mit feinem Schraubengang sind zwei Flügel von Aluminiumblech befestigt. Auf der Schraube sitzen zwei kleine Schraubenmuttern, auf welche kleine Ringe mit Oesen gesteckt sind. Werden die Muttern gedreht, so werden die Ringe, welche sich mit möglichst wenig Friction auf den Muttern drehen lassen, einander

genähert oder von einander entfernt, so dass also die an ihnen befestigten Aufhängefäden in beliebige Entfernung von einander gebracht werden können und zugleich die Aequilibrirung des Systems bis zu einem beliebigen Grade erzielt werden kann. Durch umgebogene Blechstreifen ist ferner noch ein kleines Spiegelchen an der Nadel befestigt, das in der Figur von der hinteren Seite dargestellt ist.

Der untere Suspensionsfaden ist ein Platindraht, welcher die Nadel in leitende Verbindung mit einer Klemmschraube auf der Grundplatte bringt. Zwei weitere Klemmschrauben stehen mit den beiden Plattenpaaren in Verbindung.

Beim Gebrauche bringt man den Leiter, dessen elektrische Dichtigkeit bestimmt werden soll, mit einem Plattenpaare in Verbindung, während das andere zur Erde abgeleitet ist. Soll eine Spannungs-Differenz ermittelt werden, so werden die Plattenpaare an die bezüglichen Differenzstellen angelegt. Die Nadel wird durch eine constante Elektricitätsquelle mit Elektricität von constanter Dichtigkeit geladen. Als solche Elektricitätsquelle kann eine Zamboni'sche Säule benutzt werden; besser eine Serie von vielen Kupfer-Zink-Elementen.



...sch einen ...argestellt ist. ...n ihrem Fusse ...ger der Condenbestehen aus ganz ...est, der andere b ver-

paar unter sich und mit der Elektricitätsquelle verbindet. Das andere Plattenpaar bleibt dabei zur Erde abgeleitet.

In diesem Falle ist die Ablenkung proportional dem Quadrate der zu messenden Dichtigkeit.

7. Der Condensator.

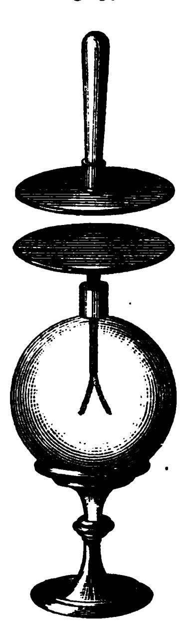
Zum Schlusse soll noch ein Apparat beschrieben werden, welcher selbst zwar kein Mess-Apparat, aber bei Messungen der statischen Elektricität nicht zu entbehren ist. Es ist dies der Condensator, der von dem im Abschnitte V beschriebenen Condensator zu unterscheiden ist. Mit diesem hat er allerdings das gemein, dass beide auf demselben Grundprincip beruhen, er unterscheidet sich aber von demselben durch seine Bestimmung. Der Condensator, welchen wir hier im Auge haben, dient dazu, die Spannung einer schwachen Elektricitätsquelle für die Messung zu erhöhen, um die Messung überhaupt oder genauer ausführen zu können.

Zu diesem Zwecke verbindet man die Elektricitätsquelle mit einer isolirten Metallplatte, der eine andere Metallplatte parallel gegenübersteht. Ist nun die zweite Platte mit der Erde in Verbindung, so ist die Ladungsfähigkeit der ersten Platte eine grössere, als diese Platte für sich ohne die zweite Platte haben würde. Trennt man nun die erste Platte, nachdem sie sich vollständig geladen hat, von der Elektricitätsquelle und entfernt dann die zweite Platte, so sinkt die Ladungsfähigkeit der Platte dadurch, oder, was dasselbe ist, die Spannung steigt, weil für dieselbe Elektricitätsmenge die Spannung umgekehrt proportional der Ladungsfähigkeit ist.

Die einfachste Construction dieses Apparates ist folgende, welche Fig. 57 zeigt, wo der Condensator mit einem Goldblatt-Elektroskop verbunden ist.

Auf den Zuleitungsdraht des Elektroskopes ist eine metallene Scheibe von 5—10 Cm. Durchmesser geschraubt. Die obere Seite der Platte ist mit einer gleichmässigen dünnen Firnissschicht überzogen.

Fig. 57.



Eine zweite gefirnisste Metallscheibe von gleicher Grösse kann mittelst eines isolirenden Stieles mit der gefirnissten Seite auf die erste Platte gestellt werden.

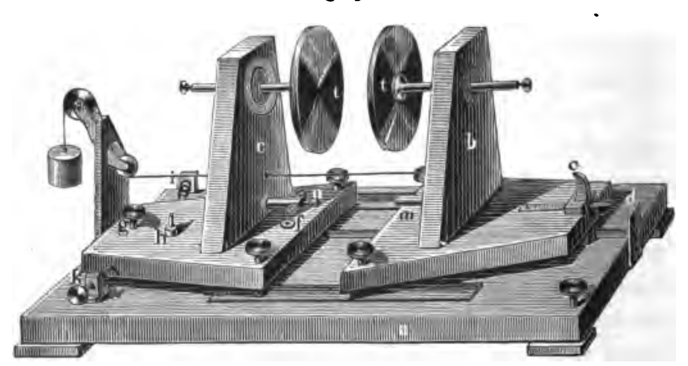
Verbindet man nun die obere oder untere Platte mit der zu untersuchenden Elektricitätsquelle und berührt die andere Platte ableitend mit der Hand oder einem Erddrahte, so sammeln sich auf beiden Platten entgegengesetzte Elektricitätsmengen an. Isolirt man darauf die Platten und hebt die obere dann ab, so wird die Elektricität der unteren Platte frei und bewirkt eine Divergenz der Goldblättchen, welche ohne Condensation gar nicht oder in schwächerem Masse zu Stande gekommen sein würde.

Für genauere Messungen hat Kohlrausch einen Condensator construirt, welcher in Fig. 58 dargestellt ist.

Auf einer mit einer Stellschraube in ihrem Fusse versehenen Bodenplatte *a* sind die Träger der Condensatorplatten aufgestellt. Dieselben bestehen aus ganz trockenem Holze; der eine *c* ist fest, der andere *b* ver-

schiebbar. Zu dem Ende gleitet der letztere mittelst zweier unterhalb angebrachter Gabeln auf einem dreiseitigen, in die Bodenplatte eingelegten Stahlprisma; er steht auf demselben durch sein eigenes Gewicht hinlänglich fest und wird durch zwei seitlich angebrachte Stellschrauben, welche auf Messinglinealen schleifen, vor dem Umkippen geschützt. Ein Gewicht zieht durch eine über eine Rolle geleitete seidene Schnur den Halter *b* nach dem Halter *c*

Fig. 58.



hin, sobald man den Haken der Feder *d* hebt, während am Griffe *e* die Hand das Gleiten mässigt oder die entgegengesetzte Bewegung ausübt.

Die verticalen Theile der Träger sind oben durchbohrt und in diese Durchbohrungen sind mit Schellack der Bewegungsrichtung des einen Trägers parallele starke Messingdrähte eingekittet. An den einander zugewandten Enden der Messingdrähte sind kreisförmige Messingscheibchen eingeschraubt, welche auf den einander zugewandten Flächen vergoldet sind. Hinter den Scheiben an den Drähten sind Klemmschrauben angebracht; in

die Klemmschraube der als Collectorplatte benutzten Scheibe wird der Zuleitungsdraht von der Elektricitätsquelle, in die Klemmschraube der anderen Platte der zur Erde ableitende Draht eingeschraubt.

Um bei der Ladung des Apparates beide Platten immer in den gleichen Abstand zu bringen, ist an dem einen Träger eine kleine Schraube *n* befestigt, deren Ebene um ein Geringes über die Ebene der Scheibe hervorsteht. An dem anderen Träger ist ein kleiner Pfosten *m* befestigt, dessen Kopf gegen die Schraube *n* stösst, wenn die Platten einander genähert sind. — Durch Drehung der Schraube *n* kann der Abstand in gewissen Grenzen variirt werden.

Fig. 59.



Sind die Platten einander genähert, so wird der Apparat geladen; dann werden die Platten voneinander entfernt, die Condensatorplatte entladen und die Collectorplatte auf ihre Elektricität untersucht. Der Abstand der beiden Platten, wenn sie voneinander entfernt sind, beträgt ungefähr 0·1 Meter; er ist so gross, dass die Vertheilung auf jeder derselben fast genau diejenige ist, als wenn die andere nicht zugegen wäre.

Anschliessend soll hier noch eines kleinen Hilfs-Instrumentes Erwähnung gethan werden, des Probescheibchens, welches dazu dient, Elektricität von einer beliebigen Stelle eines Leiters oder von einem zu stark geladenen Leiter abzunehmen. Fig. 59 zeigt ein solches, das aus einem kleinen Scheibchen Rauschgold besteht, welches auf einem mit Schellack überzogenen Glasstäbchen oder starken Glasfaden befestigt ist. Um Elek-

tricität von einem Leiter abzuheben, setzt man das Scheibchen auf die entsprechende Stelle auf, nimmt es nach einiger Zeit ab und untersucht seine Elektricität mit dem Elektrometer.

X.

Die Aufstellung und Behandlung der Instrumente.

Es erübrigt noch, über den Gebrauch der Instrumente einige Worte zu sagen, da die Handhabung so feiner Messwerkzeuge gewisse Vorsichtsmassregeln erfordert, theils um sichere Resultate zu erhalten, theils aber auch um die kostbaren Instrumente gegen Verderb zu schützen.

Bei der hohen Empfindlichkeit der heutigen Mess-Instrumente machen sich die störenden Einflüsse leichter geltend und verhindern ein genaues Messen, wenn sie nicht sorgfältig ausgeschlossen werden. Es bedarf daher einer allseitigen Isolation der Instrumente, welche nur der zu messenden Kraft eine Einwirkung auf das Instrument gestattet. Andererseits muss aber auch dafür Sorge getragen werden, dass die zu messende Kraft ganz und nicht nur theilweise zur Wirkung kommt und nicht bei der Zuleitung sich nach aussen verliert.

In erster Reihe muss sich die Sicherung auf die elektrische Isolation richten. Wenn man sich erinnert, dass fast keine physikalische Veränderung, so klein sie

auch sein mag, vor sich geht, ohne eine elektrische Spannungs-Differenz und damit einen Strom hervorzurufen, so wird man erkennen, wie leicht bei nachlässiger Isolation sich fremde Ströme in das Instrument eindrängen und das Messresultat trüben könnnen. Es ist daher erforderlich, alle Metalltheile in den Instrumenten sowohl nach aussen wie unter sich zu isoliren. Zur Isolation des ganzen Instrumentes wird dasselbe auf eine Hartgummiplatte oder auf gut polirte cylindrische Füsse von Hartgummi gestellt.

Eine weitere Quelle von Störungen ist die hohe Empfindlichkeit der magnetischen Nadeln, weil dieselben schon auf äusserst schwache magnetische Einwirkung reagiren. In erster Reihe ist hier die wechselnde Intensität des Erdmagnetismus zu nennen, der leicht zu Irrthum Anlass giebt. Mehr als dieser aber ist die Nähe von Eisen von schädlicher Wirkung auf die Nadel. Werden dergleichen einwirkende Eisenmassen bewegt, so ändert sich ihr Einfluss auf die Nadel, und diese ihre Ruhelage, wodurch bei Nichtbeachtung des störenden Einflusses eine falsche Ablesung herbeigeführt wird.

Unbewegliche Eisenmassen sind den Messungen weniger störend, so lange ihr Einfluss auf die Nadel unverändert bleibt. Da aber alles Eisen mehr oder weniger magnetisch ist und sein Magnetismus leicht Veränderungen unterliegt, so pflegen sich auch hier veränderliche Einwirkungen geltend zu machen, deren Controle fast unmöglich ist. Diese Schwankungen in den Einwirkungen sind um so grösser, je näher das Eisen der Nadel liegt, weshalb alles Eisen aus der Nähe des Instrumentes zu verbannen ist. Aus diesem Grunde dürfen die Instrumente

auch keinen Constructionstheil enthalten, bei welchem Eisen oder eines der anderen magnetischen Metalle, Nickel und Kobalt verwendet ist. Diese Forderung ist schwieriger zu erfüllen, als man glaubt. Denn da man bei den Instrumenten viele Theile aus Messing oder Kupfer anfertigt, das Kupfer aber fast stets Eisen enthält, so bedarf es vor der Montirung des Instrumentes einer genauen Untersuchung seiner Theile mittelst des Magnetometers, welches die Anwesenheit von magnetisch wirkenden Metallen verräth, und es müssen solche Theile, welche sich als unsicher erweisen, verworfen werden.

Zu weiteren Fehlern geben die Einwirkungen der Wärme Anlass. Bei ungleicher Erwärmung des Instrumentes entstehen in demselben Luftströmungen, welche die Nadel in Bewegung setzen. Man hat deshalb darauf zu achten, dass die Instrumente an einem temperirten Orte stehen und den Einwirkungen der Sonne, des Ofens, des kalten Fensters etc. möglichst entzogen bleiben.

Um den mechanischen Einwirkungen, den Stössen und Erschütterungen vorzubeugen, stellt man die Instrumente am besten auf isolirte Postamente. Die grossen Laboratorien haben zu diesem Zwecke eigene Pfeiler, deren Fundamentirung von der des übrigen Hauses ganz isolirt ist, und welche bis in die Beobachtungsräume geführt sind. Auf diese werden die Instrumente gestellt und sind so in der denkbar besten Weise gegen Stösse geschützt. Wo eine solche Einrichtung nicht möglich ist, befestigt man solide Consolen an eine dicke Wand und stellt die Instrumente darauf. Für manche Zwecke ist die Fensterbank ein günstiger Platz zur Aufstellung der Instrumente; im Leipziger physikalischen Labo-

ratorium hat man deshalb dicke Steinplatten zu Fensterbänken verwendet und dadurch einen ausgezeichneten Standplatz für die kleineren Instrumente gewonnen.

Eine besondere Aufsicht erheischen die justirten Instrumente, deren Justirung sich selten dauernd zu erhalten pflegt. Dieselben bedürfen daher von Zeit zu Zeit einer Controlprüfung, um etwaige Aenderungen der Justirung erkennen zu lassen.

Zur Controle der Torsions-Galvanometer möge das nachfolgende einfache Verfahren dienen. Man lässt einen Stahlstab von etwa 30 Cm. Länge und 3—4 Qu.-Cm. Querschnitt anfertigen, den man bis zur Sättigung magnetisirt. Durch mehrmaliges Abreissen eines angelegten Ankers von weichem Eisen wird der Magnetismus bis auf ein Mass herabgemindert, welches sich bei sonst sorgfältiger Behandlung des Magnetes unverändert erhält. Hat man nun ein neu justirtes Torsions-Galvanometer erhalten, so bestimmt man die Ablenkung, welche der Magnet in dem Torsions-Galvanometer bei einer gewissen Lage hervorbringt. Zu diesem Ende legt man den Magnet z. B. ein Meter von der Axe des Galvanometers auf der zum magnetischen Meridian Senkrechten mit dem Nordpol nach Süden hin und misst den Torsionswinkel, welcher den beeinflussten Glockenmagnet wieder in die Ruhelage zurückführt. Will man sich später überzeugen, ob die Justirung des Instrumentes noch richtig ist, so hat man den Magnet nur in die frühere Lage zum Galvanometer zu bringen und seine Wirkung auf dasselbe zu messen. Die Uebereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit der ersten Messung giebt über die etwaige Veränderung Aufschluss

und gestattet innerhalb gewisser Grenzen Correcturen der Abweichung. Der Magnetstab wird am besten in einem Futteral, das ihn gegen grosse Temperatur-Aenderungen und Stösse schützt, an einem ruhigen Orte und in der Ost-Westlage aufbewahrt.

Die Widerstands- und Capacitätsscalen müssen von Zeit zu Zeit mit zuverlässigen Etalons verglichen werden; auch empfiehlt es sich, die einzelnen Theile der Scalen unter sich zu vergleichen, weil hierdurch leicht eine eingetretene Veränderung bemerkt werden kann.

Um noch zum Schlusse einige Vorsichtsmassregeln für den Gebrauch zu erwähnen, so sei daran erinnert, dass alle Instrumente einer sorgfältigen Einstellung bedürfen. Zu einem sicheren Arbeiten mit denselben ist es nöthig, dass ihre wagrechten und lothrechten Theile auch wirklich in den Horizontalen und Normalen stehen. Alle Aufhängungen zumal erfordern ein genaues Einstellen, damit nicht die freihängenden Theile irgendwo anstossen und in ihren Bewegungen gehindert werden. Wo die Aufhängungen nicht selbst schon als Senklothe für die richtige Einstellung dienen können, wird man am besten thun, eine Libelle auf die horizontale Platte des einzustellenden Instrumentes zu legen und darnach die Stellschrauben zu reguliren.

Zum Schutze wie zur Schonung derjenigen Instrumente, welche Drahtwindungen von feinem Draht enthalten, hüte man sich, zu starke Ströme damit zu messen, damit nicht die entwickelte Wärme das Instrument unbrauchbar macht. Bei den Galvanometern hat man überdies Rücksicht auf die Bewegung der Nadel zu nehmen, welche durch zu starke Ströme heftig herum-

geworfen wird, wobei der Aufhängefaden eine bleibende oder doch andauernde Torsion erhält. Es ist darum gut, wenn man bei Messung von Strömen, über deren ungefähre Intensität man noch im Zweifel ist, einen Nebenschluss einschaltet, welcher zu wenig Widerstand hat, und ihn nach vorläufiger Messung angemessen vergrössert.

XI.
Die absoluten Masse der elektrischen Grössen.

1. Das absolute Mass-System.

Zwei elektrische Grössen derselben Art, z. B. zwei Stromstärken, lassen sich, wie wir gesehen haben, nicht unmittelbar miteinander vergleichen, wie wir etwa zwei Längen miteinander vergleichen können. Wir sahen uns vielmehr genöthigt, an Stelle der elektrischen Grösse selbst die Grösse der durch sie hervorgebrachten Wirkung zu messen. Bei genauerem Zusehen werden wir aber auch finden, dass nicht alle Wirkungen der Elektricität unmittelbar masslich bestimmbar sind, sondern dass wir von den erhaltenen Wirkungen einige noch weiter auf andere Wirkungen zurückführen müssen, um sie messen zu können. So bot uns z. B. die chemische Wirkung des Stromes ein geeignetes Messobject für die wirkende Elektricität. Die chemische Wirkung können wir aber ebensowenig direct bestimmen als eine elektrische Grösse, und so waren wir genöthigt, die Masse der zersetzten Stoffe

zu bestimmen, um einen Anhalt für die Grösse der chemischen Wirkung wie ihrer elektrischen Ursache zu haben. Diese Messung ist nichts anderes als eine Gewichtsmessung, die im Verein mit der Zeitmessung die Grundlage für unsere Elektricitäts-Messung abgiebt.

Es könnte nun leicht gezeigt werden, dass überhaupt alle Messungen, welche den Namen Messungen verdienen, auf Gewichts-, Zeit- und auf Längenmessungen zurückführen. Die beiden ersten aber führen ihrerseits auch auf die Längenmessung zurück, so dass die Längenbestimmung als das Fundament alles Messens angesehen werden muss.

Gewicht, Zeit und Länge werden nun in der Physik als die absoluten Grössen bezeichnet, und Messungen, welche in Einheiten dieser Grössen bestimmt werden, heissen absolute.

Man möge sich aber hüten, diesen absoluten Grössen eine höhere Bedeutung als anderen beizulegen und etwa zu glauben, wozu man leicht geneigt ist, dass überhaupt alle physikalischen Vorgänge nichts anderes als Veränderungen jener Grössen sind. Nichts wäre verkehrter, als eine solche Ansicht. Der Vorzug, welchen wir den absoluten, oder wie sie auch heissen, mechanischen Grössen geben, beruht lediglich darauf, dass unser Sinnesorgan ganz besonders für Längenunterschiede empfänglich ist, und wir darum unwillkürlich die Erscheinungen als Längenerscheinungen zu erfassen suchen, wenn wir sie uns möglichst deutlich machen wollen. Es ist dies eine der interessantesten Erscheinungen der Erkenntnisstheorie, doch würde es wenig am Platze sein, wenn wir hier weiter darauf eingehen wollten.

Die Zurückführung der Messung der elektrischen Grössen auf Messungen nach absolutem Masse beruht nun nach dem Gesagten darauf, dass wir die Elektricitätsmenge, welche der zu messenden Grösse entspricht, unter bekannten Umständen und in bekanntem Zusammenhange in mechanische Wirkung umsetzen und diese nach mechanischen Massen messen. Der Zusammenhang zwischen der elektrischen Ursache und demjenigen Theile der mechanischen Wirkung, welche gemessen wird und die Grundlage der Bestimmung abgiebt, muss selbstverständlich bekannt sein, um die Berechnung zu gestatten. Er kann einfach derjenige der Proportionalität sein, er kann aber auch ein durchaus anderes Gesetz repräsentiren, wie wir das z. B. bei der Tangenten-Bussole sahen, wo die bewirkte Ablenkung und die bewirkende Stromstärke in einem Zusammenhange standen, welcher sehr wesentlich von der Proportionalität verschieden war.

Es wird daher die erste Aufgabe sein, den Zusammenhang der mechanischen Wirkung mit der elektrischen Ursache zu ermitteln. Ist dieselbe bekannt, so können wir die elektrische Grösse in absoluten Einheiten ausdrücken, sobald wir die Wirkung mit diesen Einheiten gemessen haben. Die thatsächliche Messung der Wirkung nach absolutem Mass ist also die zweite Aufgabe — eine Aufgabe, deren schwierige Lösung die ganze Feinheit unserer heutigen Messkunst in Anspruch nimmt.

Wir können es uns nicht versagen, an dieser Stelle einen kurzen Rückblick auf die Geschichte der Messungen nach absolutem Masse einzuschalten, nicht ohne eine gewisse patriotische Genugthuung, da deutsche Gelehrte

einen hervorragenden, ja leitenden Antheil daran genommen haben.

Der erste, welcher eine Messung einer nicht mechanischen Grösse nach absolutem Masse ausführte, war unser grosser Gauss, dessen Bestimmung der Intensität des Erdmagnetismus nach absolutem Mass der Ausgangspunkt aller absoluten Messungen der elektrischen Grössen geworden ist. Gauss hat seine Methode in einem kleinen Schriftchen, das seither classisch geworden ist, dargelegt, und dieselbe ist um so genialer, als die Mittel, mit welchen die Messung ausgeführt wird, die denkbar einfachsten sind, wobei doch eine bewundernswürdige Genauigkeit erreicht wird.

Auf der Entdeckung seines Mitarbeiters Gauss weiterbauend, ging Weber daran, den nunmehr bestimmbaren Erdmagnetismus zur absoluten Messung der Elektricität zu benützen.

Aus der Elektricitätslehre wissen wir, dass ein Kreisstrom in seiner Wirkung durch einen Magnet ersetzt werden kann. Ein solcher Kreisstrom, dessen Dimensionen mittelst der Längenmasse bestimmt werden können, wirke nun auf einen anderen Magnet, dem er ein Drehungsmoment ertheilen soll. Ist diese Wirkung derjenigen des Erdmagnetismus entgegengesetzt, so kann aus der Ablenkung des Magnets, aus der gemessenen und nach absolutem Masse bestimmten Grösse der Erdmagnetismus, und aus den Dimensionen des Kreisstromes die Stromstärke des Kreisstromes in absoluten Massen bestimmt werden.

Es wird also hier die Elektricität in Magnetismus umgesetzt, und dieser mit den absoluten Einheiten ge-

messen. Weber nennt diesen Zusammenhang den elektromagnetischen. Die elektromagnetische Einheit der Stromstärke ist alsdann diejenige, deren Wirkung gemäss des elektromagnetischen Zusammenhanges gleich der Einheit der Länge, der Zeit und des Gewichtes ist.

Dieser Zusammenhang ist aber nicht der allein angewendete, vielmehr sind noch zwei andere vorhanden, bei welchen den Einheiten der Länge, der Zeit und des Gewichtes andere Stromstärken entsprechen, die also andere Intensitäts-Einheiten haben. Der Längen-, Zeit- und Gewichts-Einheit entsprechen somit je nach dem verschiedenen Zusammenhange drei verschiedene Stromstärke-Einheiten.

Die erste derselben war die elektromagnetische; die zweite ist von Weber als die elektrodynamische bezeichnet, welche die Wirkung zweier Ströme aufeinander als Grundlage benutzt.

Wir können nämlich die Elektricität in der Weise in mechanische, also nach absolutem Masse messbare Kraft umsetzen, dass wir zwei parallele Ströme aufeinander einwirken lassen. Je nachdem die Stromrichtungen in beiden gleich oder entgegengesetzt sind, ziehen sich die Ströme an oder stossen sich ab, und die so entwickelte Kraft giebt ein Mass für die Stromstärke ab. Diejenige Stromstärke, welche in diesem Zusammenhange unter den Einheitsverhältnissen die Einheit der Kraft entwickelt, ist als Einheit der Stromstärke gemäss diesem Zusammenhange oder als die elektrodynamische Einheit anzusehen. Sie steht, wie wir sehen werden, mit der elektromagnetischen Einheit in einem einfachen Zusammenhange.

Eine dritte Art des Zusammenhanges zwischen Elektricität und mechanischer Wirkung ergiebt die mechanische Einheit der elektrischen Grössen. Zwei Elektricitätsmengen ziehen sich an oder stossen sich ab, je nachdem sie ungleicher oder gleicher Art sind. Das Mass der in der Abstossung oder Anziehung hervorgebrachten Kraft giebt ein Mass für die als quantitativ gleich vorausgesetzten Elektricitätsmengen.

Ist bei der Einheit der Entfernung diese Kraft gleich der Einheit von Zeit–Länge–Gewicht, so sind die wirkenden Elektricitätsmengen als die Einheiten nach mechanischem Mass anzusehen.

Den galvanischen Strom pflegen wir uns nun so vorzustellen, dass wir annehmen, durch jeden Querschnitt bewegen sich in derselben Zeit gleiche Mengen entgegengesetzter Elektricitäten in entgegengesetzten Richtungen. Gehen nun durch einen Querschnitt in der Zeit-Einheit zwei entgegengesetzte Elektricitätsmengen, jede gleich der oben definirten Einheit, so ist die so entstehende Stromstärke als die Einheit der Stromstärke nach absolutem mechanischen Masse anzusehen.

Je grösser die Geschwindigkeit ist, mit der sich die beiden Elektricitätsmengen aneinander vorbei bewegen, um so grösser wird auch die Stromstärke sein, um so grösser wird aber auch die elektromotorische Kraft sein, welche die beiden Elektricitäten in Bewegung setzt. Für diese elektromotorische Kraft giebt aber offenbar die Menge der durch sie in Bewegung gesetzten Elektricität und die erzielte Geschwindigkeit ein Mass ab. Demnach wird nach absolutem mechanischen Mass die Einheit der elektromotorischen Kraft diejenige sein, welche den Ein-

heitsmengen der Elektricität die Einheit der Geschwindigkeit ertheilt.

Aus Stromstärke und elektromotorischer Kraft lässt sich aber nach dem Ohm'schen Gesetze der Widerstand bestimmen, und es wird also die Widerstands-Einheit nach absolutem Masse dem Quotienten

$$\frac{\text{absolute Einheit der elektromotorischen Kraft}}{\text{absolute Einheit der Stromstärke}}$$

sein. Sobald es also möglich ist, Stromstärke und elektromotorische Kraft absolut zu messen, ist auch die Bestimmung des Widerstandes in absolutem Mass ermöglicht. Es ist demnach unsere nächste Aufgabe, die Messung jener beiden Grössen darzustellen.

Zuvor aber noch ein Wort über die Grund-Einheiten alles absoluten Messens, nämlich der Längen-, Gewichts- und Zeit-Einheit.

Als die Normal-Einheit der Länge gilt für die wissenschaftliche Welt der Normalmeter, wie es seinerzeit von den französischen Gelehrten hergestellt worden ist und in Paris aufbewahrt wird. Für unsere Zwecke bedienen wir uns aber einer Unter-Einheit, des Centimeters; dasselbe soll fortan abgekürzt mit C. bezeichnet werden.

Die Gewichts-Einheit ist das Gramm (Gr.), das Gewicht eines Cubikcentimeters von chemisch reinem Wasser in seiner grössten Dichte bei 4^0 Celsius.

Die Zeit-Einheit ist die Secunde, die mit *S* bezeichnet werden soll.

Als absolute Masse werden somit diejenigen bezeichnet, welche in der Einheit *C. G. S.*, in Centimeter-Gramm-Secunde ausgedrückt sind.

2. Die Messung der Stromstärke nach absolutem Masse.

Nach absolutem elektromagnetischen Masse hat derjenige Strom die Stromstärke Eins, welcher die Flächen-Einheit umkreisend, dieselbe magnetische Wirkung ausübt, wie ein Magnet vom Momente Eins. Ist umgekehrt die Stromstärke eines Stromes, der eine Fläche vom Radius R umkreist, in elektromagnetischem Masse gleich i, so wirkt dieser Strom wie ein Magnet vom Momente

$$M = \pi R^2 i$$

Wirkt nun ein solcher Kreisstrom auf einen Magnet, der in der Entfernung r vom Mittelpunkte des Kreisstromes aufgehängt ist, so wird der Magnet aus dem magnetischen Meridian abgelenkt werden. Ist r gross genug, dass das Tangenten-Gesetz in Anwendung kommt, so werden sich die Wirkungen des Erdmagnetismus und des Kreisstromes an dem abgelenkten Magnet für einen Ablenkungswinkel v das Gleichgewicht halten, für welchen

$$T \sin v = 2 \pi i \frac{R^2}{r^3} \cos v$$

wo T die in absolutem Masse bestimmte horizontale Componente des Erdmagnetismus bedeutet. Alsdann ist die Stromstärke in absolutem Masse

$$i = \frac{r^3 T}{2 R^2 \pi} \operatorname{tg} v$$

Dieser Ausdruck enthält nur noch Zahlen und absolute Masse; denn nachdem T in absolutem Masse bestimmt ist, bleibt nur noch R und r zu bestimmen übrig, die beide als Längen absolut bestimmbar sind.

Da es für manchen nicht ohne Interesse sein wird, die Methode von Gauss kennen zu lernen, mittelst welcher die horizontale Componente des Erdmagnetismus nach absolutem Masse bestimmt wird, so soll hier eine kurze Darstellung derselben eingeschaltet werden, wobei jedoch die mathematische Ausführung in Wegfall kommt.

Wenn T die horizontale Componente ist, so wird die Wirkung derselben auf einen Magnet umso grösser sein, je grösser der Magnetismus desselben ist. Wird dieser letztere mit M bezeichnet, so ist MT die Kraft, mit welcher T auf den Magnet wirkt. Ist nun dieser Magnet horizontal an einem Faden aufgehangen, so dass er sich wie die Nadel eines Galvanometers hin- und herbewegen kann, so wird er unter dem Einfluss des Erdmagnetismus, ähnlich wie ein Pendel unter Einwirkung der Schwere, hin- und herschwingen. Die Zeit, welche der Magnet zu jeder Schwingung gebraucht, hängt erstens ab von der bewegenden Kraft, hier von MT also, und ist der Wurzel derselben proportional. Zweitens hängt sie aber von einer Grösse, genannt Trägheitsmoment, ab, welche durch die Form des schwingenden Körpers und die Dichtigkeit seiner einzelnen Theile gegeben ist.

Die Schwingungszeit können wir mit Leichtigkeit bestimmen. Zur Bestimmung des Trägheitsmomentes hat Gauss eine ebenso einfache wie geniale, experimentelle Methode angegeben, so dass diese Grösse mit genügender Schärfe gemessen werden kann. Da nun zwei von den drei zusammenhängenden Grössen und der Zusammenhang selbst bekannt ist, so können wir daraus die dritte Grösse berechnen. Diese dritte Grösse ist

aber die Kraft, mit welcher T auf den Magnet wirkt, oder

$$MT$$

Nun ersetzen wir den schwingenden Magnet durch einen anderen und benutzen ihn zur Ablenkung dieses zweiten, indem wir ihn in einer gewissen Lage und Entfernung von demselben hinlegen. Auf den zweiten Magnet wirkt sowohl der Erdmagnetismus T als auch der Magnetismus M des ersten Magnetes. Die ausgeübten Kräfte sind dann nach dem Vorigen gleich

$$mT \text{ und } mM,$$

wenn m den Magnetismus des zweiten Magnetes bedeutet. Es wird nun der Winkel, um welchen der zweite Magnet von dem magnetischen Meridian abgelenkt wird, von dem Verhältniss der beiden Kräfte mT und mM zu einander abhängen, so dass aus dem Ablenkungswinkel das Verhältniss

$$\frac{mT}{Mm} = \frac{T}{M}$$

bestimmt werden kann. Aus $\frac{T}{M}$ und dem schon ermittelten MT kann aber M sowohl wie T für sich bestimmt werden und damit wäre unsere Aufgabe, die horizontale Componente des Erdmagnetismus zu messen, gelöst.

Die zweite Methode, die Stromstärke nach absolutem Masse zu bestimmen, ist die elektrodynamische. Parallele Ströme ziehen sich an oder stossen sich ab, je nachdem ihre Richtung gleich oder entgegengesetzt ist. Die Grösse der dabei entwickelten mechanischen Kraft hängt bekanntlich von den Stromstärken der beiden Ströme und der Entfernung der einzelnen Theile der Ströme von einander ab.

Bezeichnen wir mit W die ausgeübte mechanische Wirkung, mit I und I' die beiden Stromstärken, und mit F eine Grösse, welche aus der Lage der einzelnen Theile der Ströme berechnet werden kann, so ist

$$W = I I' F$$

oder, wenn beide Ströme gleiche Intensitäten haben,

$$W = I^2 F$$

W und F lassen sich mit Längen-, Gewichts- und Zeitmassen bestimmen, und somit kann auch I in absolutem Masse dargestellt werden.

Bei dieser Methode ergiebt sich für die Einheit *C. G. S.* eine andere Stromstärke, als bei der Messung nach elektromagnetischem Masse. Das Verhältniss der beiden Einheiten ist

$$\frac{\text{elektrodynamische Einheit}}{\text{elektromagnetische Einheit}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Hiernach könnnen wir die Messungen in der einen Einheit leicht in solche nach der anderen verwandeln.

Für die heutige Praxis hat man die elektromagnetische Einheit der Stromstärke als die Grund-Einheit gewählt. Wegen des Anschlusses an frühere Masse hat man jedoch nicht diejenige Intensität als Eins angenommen, deren elektromagnetisches Mass gleich dem Centimeter—Gramm—Secunde ist, sondern die zehnmal kleinere, also die Stromstärke 10^{-1} C. G. S. Dieselbe ist zu Ehren des grossen französischen Physikers »Ampère« genannt worden.

Für die Stromstärke ergiebt sich der Ausdruck

$$i = \frac{R\,T}{2\,\pi} \operatorname{tg} \alpha$$

wenn man dieselbe so misst, dass eine Magnetnadel in

16*

der Mitte eines kreisförmigen Leiters aufgehängt ist, durch welchen der Strom von der Intensität i kreist. R bedeutet hier den Radius der umschlossenen Kreisfläche, T die Intensität der horizontalen Componente des Erdmagnetismus und α die durch den Strom bewirkte Ablenkung der Nadel.

Werden R und T in absolutem Masse gegeben, so ist damit auch i in absolutem Masse dargestellt. Die Intensitäts-Einheit 1 Ampère ist alsdann diejenige, für welche der obige Ausdruck den Werth 10^{-1} annimmt, also

$$10\ R\ T \operatorname{tg} \alpha = 2\ \pi \text{ ist.}$$

3. Die Messung des Widerstandes nach absolutem Masse.

Durch den Erdmagnetismus kann man wie mit einem anderen Magnet, in einem geschlossenen Leiter einen Strom induciren, welcher der Intensität des Erdmagnetismus proportional sein wird und im Uebrigen von den gewählten Dimensionen des Leiters und seinem Widerstande abhängt, so dass also bei constantem Widerstande die elektromotorische Kraft des Erdmagnetismus durch diesen und die Leiterdimensionen, also nach dem schon früher Gesagten in absolutem Masse dargestellt werden kann. Misst man alsdann noch die Stromstärke des erzeugten Stromes nach absolutem Masse, so kann man mittelst der Ohm'schen Formel

$$W = \frac{E}{I}$$

auch den Widerstand in absolutem Masse geben.

Zur Ausführung dieser Messung wird ein Leiter, welcher aus einer oder mehreren Kreiswindungen besteht,

so aufgestellt, dass er um eine verticale Axe gedreht werden kann. Wird derselbe aus seiner Anfangslage, welche mit dem magnetischen Meridian zusammenfiel, um 90⁰ gedreht, so wird der Erdmagnetismus eine elektromotorische Kraft ausüben, welche gleich ist dem Producte aus der Intensität der horizontalen Componente des Erdmagnetismus und der von den Windungen eingeschlossenen Fläche, dividirt durch die Zeit, welche die Drehung in Anspruch nahm.

Steht jener inducirte Leiter mit einem anderen in Verbindung, der gleichfalls aus mehreren Kreiswindungen besteht, so wird der im ersten Leiter erzeugte Strom im zweiten eine magnetische Wirkung auf eine Magnetnadel ausüben können, deren Grösse von der Intensität des Stromes, den Dimensionen des zweiten Leiters, der Entfernung der Nadel von diesem Leiter und dem Erdmagnetismus abhängt.

Diese Grösse kann aber mittelst der Schwingungsdauer und der Elongation der gewählten Magnetnadel gemessen werden, so dass wir schliesslich für die Intensität des Stromes im zweiten Leiter einen Ausdruck erhalten, welcher nur von dem Erdmagnetismus, den Dimensionen des Leiters, der Entfernung der Nadel vom Mittelpunkt des Leiters, der Elongation und Schwingungsdauer derselben und der Dauer der Einwirkung, d. h. der Dauer der Drehung des ersten Leiters abhängt.

Vereinigen wir diesen mit dem schon gefundenen Ausdruck für die elektromotorische Kraft, so erhalten wir den Widerstand der beiden Leiter zusammen in absolutem Masse. Die Drehungsdauer des ersten Leiters kommt dabei in Wegfall.

Mittelst dieser Methode hat zuerst Weber und nach ihm Kohlrausch das absolute Mass der Siemens-Einheit bestimmt. Später hat die British Association nach abgeänderten Methoden ein neues Widerstandsmass, den »Ohm«, aufgestellt, welcher etwas grösser als die Siemens-Einheit ist. Dasselbe ist gleich

$$10^9 \frac{\text{Millimeter}}{\text{Secunde}}$$

in welchem Ausdrucke die Längenmasse von den Dimensionen der angewendeten Leiter und Entfernung der Nadel, die Secunden aber von der beobachteten Schwingungsdauer der Nadel herrühren.

Zwei Leiter der gedachten Art und Verbindung werden demnach den Widerstand 1 Ohm haben, wenn ihre Dimensionen und die Grösse der Wirkung des zweiten Leiters auf die Magnetnadel, wie sie sich in Elongation und Schwingungsdauer derselben äussert, in dem Ausdruck für

$$\frac{E}{I} = W$$

eingesetzt, den Werth

$$10^9 \frac{\text{Millimeter}}{\text{Secunde}}$$

ergeben.

Der Ausdruck selbst, wie er sich aus den Rechnungen ergiebt, lautet

$$W = \frac{E}{I} = \frac{\pi^3 \, r_1{}^2 \, r_2{}^2}{u \, R^3 \, . \, t}$$

wo r_1 den Radius des Kreises bedeutet, welcher gleich der Summe der von Windungen des ersten Leiters umschlossenen Flächen ist, r_2 die gleiche Grösse für den

zweiten Leiter, ferner R die Entfernung der Nadel vom zweiten Leiter, u die Elongation, t die Schwingungsdauer und endlich π die bekannte Verhältnisszahl ist.

Aus Intensität und Widerstand ergiebt sich alsdann die Einheit für die elektromotorische Kraft

$$1 \text{ Volt} = 1 \text{ Ohm} \times 1 \text{ Ampère}$$

oder ein Volt ist gleich 10^8 der gewählten absoluten Einheiten, nämlich der *C G S*, der Centimeter—Gramm—Secunde.

Als zwei weitere Einheiten elektrischer Grössen sind ferner noch der Coulomb und der schon erwähnte Farad angenommen worden.

Coulomb ist diejenige Elektricitätsmenge, welche bei einem Ampère Stromstärke in einer Secunde durch einen Querschnitt des Leiters strömt. Ist diese Quantität als Ladung in einem Leiter und erzeugt sie dort eine Spannung von einem Volt, so hat dieser Leiter die Ladungsfähigkeit 1 Farad.

In den *C G S*-Massen ist ein Coulomb

$$= 10^{-1}$$

ein Farad

$$= 10^{-9}$$

der gewählten Einheiten.

Nachtrag.

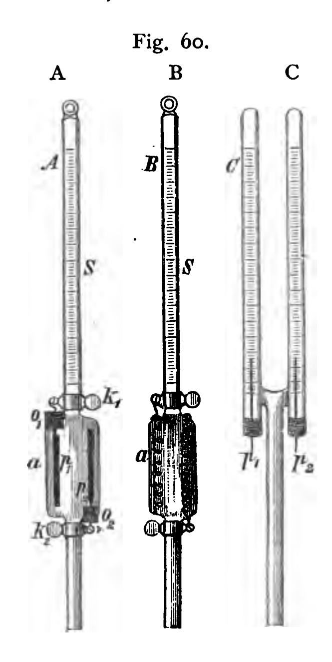
1. Einfache Voltameter.

Die Voltameter von der Art, wie das in Fig. 1 dargestellte, haben den Fehler, dass sie unbequem zu handhaben sind; ich habe deshalb Voltameter construirt, welche ebenso einfach als bequem sind, und die hier kurz beschrieben werden sollen. Eine oben geschlossene Glasröhre *S* (Fig. 60 A) erhält etwa 10 Cm. vom offenen Ende eine flache Ausbauchung, welche zwei Oeffnungen hat. Diese Oeffnungen werden durch Pfropfen fest verschlossen. Durch die Pfropfen führen Platindrähte, an welchen die Platinbleche p_1 und p_2 sitzen, welche als Elektroden dienen. Auf der Glasröhre sind die Klemmen k_1 und k_2 befestigt, an welche die Zuleitungen von p_1 und p_2 führen. Der Theil der Glasröhre über der Ausbauchung, die Spindel, ist graduirt. Um das Instrument zu gebrauchen, kehrt man es um, füllt es mit Wasser und bringt die mit dem Finger verschlossene Oeffnung unter Wasser, worauf man es am Stativ aufhängt und zum Gebrauch fertig hat. Für Demonstrationsversuche vor einer grösseren Zuhörer-

schaft wählt man ein Voltameter mit langer, dünner Spindel und benutzt gefärbtes Wasser.

Für kleinere Voltameter werden als Elektroden einfach eingeschmolzene Platindrähte angewendet, wie es Fig. 60 B erkennen lässt.

Fig. 60.



Um die entwickelten Gase getrennt zu erhalten, bedient man sich des Voltameters, welches in Fig. 60 C dargestellt ist, und dessen Einzelheiten man nach dem Gesagten leicht erkennen wird.

In dieser Form lassen sich auch bequeme Differential-Voltameter construiren, welche mehrfach zu Messungen benützt werden.

2. Einfaches transportables Spiegel-Galvanometer nach Kohlrausch.

Von Prof. Kohlrausch, welchem die elektrische Messkunde so viel zu verdanken hat, sind eine Reihe ausgezeichneter Mess-Apparate construirt worden, welche zum grössten Theile allerdings für die exacten wissenschaftlichen Messungen bestimmt sind, und deren Beschreibung wir uns daher hier versagen müssen. Einzelne der Instrumente haben aber auch für den Elektrotechniker Bedeutung, und von diesen insbesondere das leicht transportable Spiegel-Galvanometer, welches von Herrn Kohlrausch in Wiedemann's Annalen Bd. XV, 1882 beschrieben ist, und welches von der bekannten Firma E. Hartmann & Co. in Würzburg ausgeführt wird.

Bei der Construction dieses Instrumentes waren folgende Gesichtspunkte massgebend: Das Instrument sollte klein und leicht transportabel sein und seine Aufstellung möglichst wenig Mühe machen; auch sollte schon ein mässig feste Basis, wie sie etwa der Experimentir-Tisch im Hörsaal bietet, genügen. Die Dämpfung sollte variabel sein und sollte bis zu einem hohen Grade verstärkt, andererseits aber auch beliebig herabgemindert werden können, wie es manche Zwecke erfordern. Die Durchbrechung des Multiplicators (der Drahtwindungen) sollte umgangen werden, ohne dass durch zu kurzen Aufhängefaden ein zu hoher Torsionscoefficient entstände. Das Instrument sollte als Galvanometer für schwache Ströme in ziemlich weiten Grenzen dienlich sein und

besonders auch als Differential-Galvanometer gebraucht werden können. Ausserdem sollte eine möglichst einfache Ausführung erstrebt werden.

Diesen Bedingungen ist nun in dem in Fig. 61 dargestellten Instrumente in folgender Weise genügt

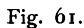
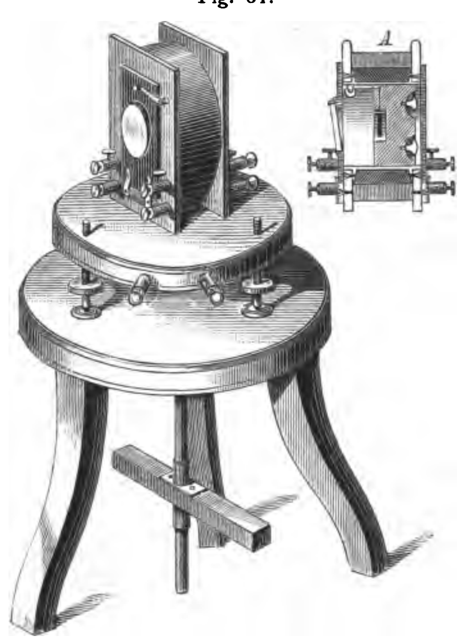


Fig. 61.



worden. Die Nadel des Galvanometers ist ein magnetisirter Stahlspiegel von 18 Mm. Durchmesser, wie ihn das Wiedemann'sche Galvanometer Fig. 13 hat. Dieselbe ist innerhalb eines Multiplicators aufgehängt. Um den Aufhängefaden, der Torsion wegen, nicht zu kurz

zu machen, ist diesem Multiplicator eine elliptische Form gegeben, wobei die längere Axe der Ellipse vertical zu stehen kommt.

Die lichte Höhe der Ellipse ist 60 Mm., die Breite 30 Mm.; der Rahmen, auf welchen die Windungen gewickelt sind, ist 30 Mm. breit. Der Aufhängefaden ist durch eine Oese im Multiplicator gezogen und an ein Röllchen geführt, das aussen am Rahmen befestigt ist und durch welches der Coconfaden angezogen oder nachgelassen werden kann. Da der tragende Faden etwa 20 Mm. lang ist, so bleibt der Einfluss der Torsion noch innerhalb zulässiger Grenzen.

Der Kupferdämpfer, welcher in Fig. 61A dargestellt ist, besteht aus elektrolytischem Kupfer. Er kann bis über die Nadel geschoben werden und hat zu diesem Zwecke eine Ausbohrung, welche der Nadel Spielraum gewährt. Durch Ausziehen des Dämpfers kann die Dämpfung beliebig vermindert werden.

Die Windungen bestehen aus zwei Lagen Drahtwindungen. Jede der beiden Lagen besteht aus zwei ganz gleichen Drähten, welche neben einander und gleichzeitig aufgewickelt sind. Die Drahtstärken beider Lagen sind verschieden, und ihre Empfindlichkeiten verhalten sich wie 1 : 10. Mittelst der vier Drähte kann man also die 4 Empfindlichkeiten 1, 2, 10 und 20 erzielen, so dass auch bei Stromstärken, die sich wie 1 : 200 verhalten, noch passende Ausschläge erhalten werden können. Die Widerstände eines dünnen Drahtes sind 30 S.-E., die eines dicken 0.25 S.-E., so dass man mit den Widerständen 0.125, 0.25, 0.5, 15, 30 und 60 S.-E. arbeiten kann.

Die Tangenten der Ausschlagwinkel sind den Stromstärken sehr nahe proportional. Die Empfindlichkeit des Instrumentes ist gross genug, um noch bei einem Daniell-Element und 10 Millionen S.-E. Widerstand einen deutlichen Ausschlag erkennen zu lassen.

Mit Hilfe eines unter dem Tischchen angebrachten Regulirmagnetes kann die Empfindlichkeit beliebig erhöht werden.

Universal-Galvanometer von Hartmann.

Die schon vorhin genannte Firma E. Hartmann & Comp. baut neuerdings ein Galvanometer, welches von den auf S. 40 u. ff. beschriebenen in manchen Stücken abweicht und deshalb hier beschrieben werden soll, wobei wir der in dem »Elektrotechniker«, II. Jahrgang 1883, gegebenen Darstellung des Herrn Hartmann folgen.

In einem soliden, mit Stellschrauben versehenen Messingdreifuss (Fig. 62) sitzt mittelst eines starken Conus, sanft drehbar und durch eine Klemmschraube festzustellen, eine Alhidade. Diese trägt auf zwei kräftigen Säulen eine Brücke, mit welcher die Stütze für die Torsionsröhre, in einem Stücke gegossen, verbunden ist.

Der Magnet, ein Glockenmagnet, wie er auf S. 49 beschrieben, ist an eine 2 Mm. dicke Aluminiumstange angeschraubt, an welcher eine leichte Aluminiumfassung mit dem Planspiegel federnd gleitet und in jeder Stellung sicher festgehalten wird.

Die vorerwähnte äusserst massive Stütze der Torsionsröhre ist von solcher Gestalt, dass sie dem Spiegel eine Drehbarkeit von etwas mehr als drei

Quadranten erlaubt. Um die Stütze schliesst sich ein

Fig. 62.



Mantel zum Schutze des Spiegels gegen Luftzug. Die

Einsicht dieses Mantels ist durch ein Planglas geschlossen, welches, wie bei allen Hartmann'schen Spiegel-Instrumenten, um einige Grade abwärts geneigt ist, so dass störende Reflexbilder der Scala vermieden werden.

Der Dämpfer, aus elektrolytischem Kupfer hergestellt, besteht aus zwei Hälften, deren eine durch einen massiven Kupferträger mit der Alhidade fest verbunden ist. Die andere Hälfte kann an die erste fest angepresst werden, und umschliessen beide dann den Magnet, indem sie ihm nur wenig Spielraum lassen. Bei der sorgfältigen Centrirung aller Theile schwingt der Magnet stets frei, wenn das Instrument mittelst der auf einem Bein des Dreifusses befestigten Dosenlibelle eingestellt ist.

Ist der Magnet ganz tief in den Hohlraum des Dämpfers eingesenkt, so schwingt er bei der stärksten Ablenkung aperiodisch; durch Heben des Magnetes aus dem Dämpfer kann die Aperiodicität beliebig verringert werden.

Die Multiplicatorrollen können auf einer dickwandigen Messingröhre, die auf der Alhidade befestigt ist, verschoben werden, zu welchem Zwecke auf den Röhren Zahnstangen befestigt sind, in welche die mit den Rollen verbundenen Triebe eingreifen. Die Schienen sind von der Mitte aus mit Millimetertheilung versehen.

Eigenthümlich ist eine bei dem Instrumente angewendete Vorrichtung zur Astasirung des Magnetes, welche von Prof. Braun vorgeschlagen ist. Es umgiebt nämlich ein 40 Mm. breiter und 10 Mm. dicker Ring aus weichem Eisen das Instrument, welcher, auf drei

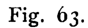
Punkten ruhend, von zwei Trägern gehalten wird, die sich an den Säulen vertical verschieben und feststellen lassen. Das Eisen wird durch den Erdmagnetismus magnetisirt, und je nach seiner Stellung zu den Polen des schwingenden Magnetes bewirkt er eine Erhöhung der Empfindlichkeit des Instrumentes bis auf das Sechsfache.

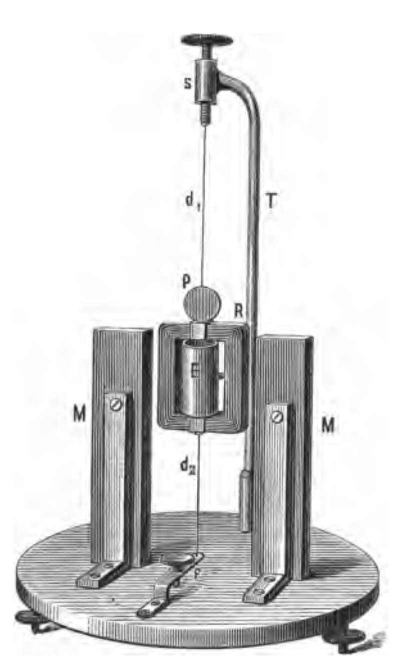
Galvanometer von Deprez und d'Arsonval.

Von Deprez und d'Arsonval ist ein Galvanometer construirt, welches sich durch seine Einfachheit und Aperiodicität auszeichnet. Ein kräftiger, permanenter Hufeisenmagnet M (Fig. 63) steht senkrecht, mit seinen Schenkeln nach oben auf einer Grundplatte. Auf derselben steht isolirt der metallene Träger T, welcher eine Suspensionsvorrichtung s trägt. An dieser hängt mittelst eines feinen Silber- oder Kupferdrahtes d_1 das Rähmchen R, welches Windungen vom feinsten übersponnenen Draht trägt. Ein zweiter Draht d_2 führt von dem Rähmchen nach unten an die Feder f, welche durch eine Schraube niedergedrückt werden kann, wodurch die Drähte d_1 und d_2 angespannt werden. Die beiden Enden des auf den Rahmen gewickelten Drahtes stehen mit den Suspensionsdrähten d_1 und d_2 in Verbindung, so dass diese also als Zuleitungen dienen. Zu diesem Zwecke sind der Träger T und die Feder f mit Klemmschrauben in leitender Verbindung. Innerhalb des Rahmens R befindet sich der Cylinder E aus weichem Eisen, welcher an T befestigt ist und das durch die Pole des Magnetes erzeugte magnetische Feld verstärkt.

Zur Ablesung des Ausschlages dient das Spiegelchen *P.*

Giebt man dem Rahmen bei ungeschlossenem Stromkreise eine Ablenkung, so macht er eine Reihe


Fig. 63.



Schwingungen, bis er zur Ruhe kommt. Verbindet man aber die beiden Klemmschrauben durch einen Draht, so geht der Rahmen sofort in die Ruhelage zurück, ohne eine Schwingung zu machen.

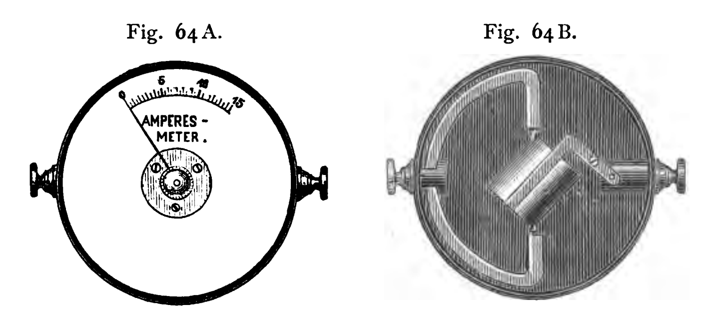
Mess-Instrumente für starke Ströme bei industriellen Anlagen.

Die Nothwendigkeit, bei elektrischen Anlagen ohne alle Umstände und jederzeit Stromstärke und Spannungen zu erkennen, hat die Erfinder veranlasst, solche Instrumente herzustellen, welche bei grosser Einfachheit und verhältnissmässiger Billigkeit leicht mit der Leitung verbunden werden können und sofort die Intensität oder die Spannung in absoluten Einheiten anzeigen, die also etwa den Manometern der Dampfmaschinen zu vergleichen sind. Im I. Bande dieser Bibliothek sind die Ampère- und Volt-Meter von Perry und Ayrton beschrieben worden. Der Unterschied dieser Mess-Instrumente von den Galvanometern u. s. w. besteht darin, dass bei diesen der Strom durch eine Anzahl Drahtwindungen, durch den sogen. Multiplicator, geleitet wird, der auf eine Magnetnadel wirkt, während bei den Ampère- und Voltametern der Strom durch einen Elektromagnet geht, welcher alsdann auf eine Nadel einwirkt. Bei dieser Anordnung ist die Wirkung des Stromes auf die Nadel weit kräftiger, und der ganze Apparat kann daher robuster gebaut werden, wie es für ein Instrument, das bei industriellen Anlagen gebraucht werden soll, nothwendig ist. Selbstverständlich ist die Abhängigkeit zwischen Ablenkung und Stromstärke nicht mehr die durch das Tangentengesetz (S. 34) ausgedrückte, welche bei den anderen Mess-Instrumenten giltig war; vielmehr herrscht hier ein sehr viel complicirteres Gesetz, und wir sind nicht im Stande, aus der Ablenkung die Stromstärke zu berechnen. Die Instrumente dieser Art werden daher empirisch geaicht,

indem für die einzelnen Stromstärken die zugehörige Ablenkung auf die Scala aufgezeichnet wird. Aenderte sich der Apparat im Laufe der Zeiten nicht, so wäre gegen diese Messvorrichtung nichts einzuwenden; allein das ist nicht zu erwarten, und deshalb können diese Instrumente nur da Anwendung finden, wo eine gelegentliche Falschanzeige keinen Schaden anrichten kann.

Fig. 64 giebt die Ansicht eines solchen Ampère-Meter von Deprez und Carpentier, das von 1—15

Fig. 64 A. Fig. 64 B.



Ampères oder mit Nebenschluss bis zu 100 Ampères anzeigen kann. Der bequeme und gefällige Apparat hat 120 Mm. Durchmesser.

Die Construction dieses Instrumentes ist folgende: Die Schenkel eines Hufeisenmagnetes, der im Innern der Dose befestigt ist, biegen sich nach der Mitte hin zusammen und nähern sich bis auf eine geringe Entfernung. In diesem hierdurch gebildeten, kräftigen magnetischen Felde liegt eine kleine Magnetnadel, welche mit dem Zeiger auf der Scala, der aus einem Pferdehaar besteht, verbunden ist. Auf diese Magnet-

nadel wirkt der Solenoid, dessen Axe einen Winkel mit dem Felde bildet, welcher etwa 40 Grad beträgt, also nicht ein rechter Winkel ist. Hierdurch wird erzielt, dass die Wirkung des Stromes auf die Nadel in dem einen Sinne verdoppelt, in dem anderen fast aufgehoben wird. Das Instrument muss daher immer in einem bestimmten Sinne in den Stromkreis eingeschaltet werden.

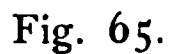
Widerstandsmessung von Elektrolyten.

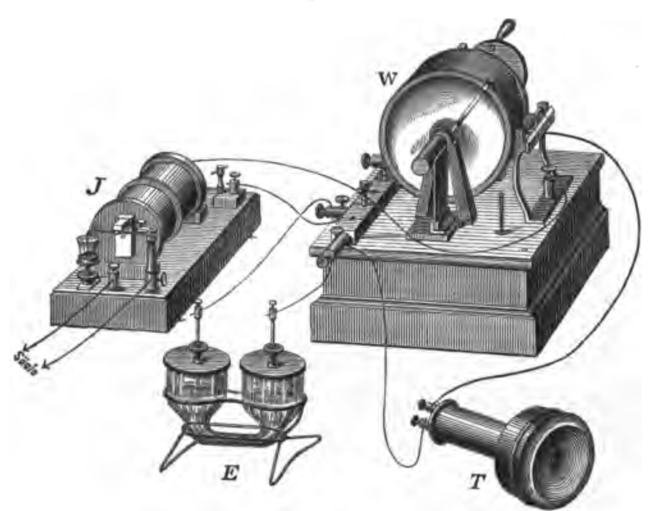
Wie schon früher erwähnt, bietet die Messung des Widerstandes von Flüssigkeiten, welche durch den Strom zersetzt werden, dadurch Schwierigkeit, dass durch die Zersetzung ein Gegenstrom hervorgerufen wird, welcher den Widerstand der Flüssigkeit vergrössert. Von Prof. Kohlrausch ist nun eine sehr einfache Methode angegeben worden, diesem Uebelstande abzuhelfen, indem man sich nicht eines continuirlichen Stromes beim Messen bedient, sondern eines Wechselstromes. Bei diesem kommt eine Zersetzung der Elektrolyten nicht zu Stande, indem an den Elektroden in raschem Wechsel bald der elektropositive, bald der elektronegative Bestandtheil ausgeschieden werden, die sich sofort wieder mit einander verbinden, so dass eine Polarisation nicht stattfinden kann.

Zur Erzeugung der Wechselströme bedient sich Kohlrausch eines Inductions-Apparates, welcher bekanntlich beim Schliessen und Oeffnen des primären Stromes entgegengesetzte Inductionsströme giebt. Um den Oeffnungsstrom nicht zu rasch verlaufen zu lassen, ersetzt Kohlrausch den aus einem Bündel Eisen-

drähte bestehenden Kern der primären Spule durch einen massiven Eisenkern, welcher seinen Magnetismus langsamer verliert und damit auch einen langsameren Verlauf des Oeffnungsstromes bewirkt.

Die zu untersuchende Flüssigkeit kommt in eine Glasröhre, welche an den Enden umgebogen ist und


Fig. 65.



hier sich schalenförmig erweitert, um die Platinelektroden aufzunehmen.

Die Messung des Widerstandes geschieht in der Weise, dass man den Brückenzweig, in welchem der zu bestimmende Widerstand liegt, ungeändert lässt, dagegen das Theilungsverhältniss des anderen Brückenzweiges ändert, dass man also im Brückenzweig $A\,D\,B$

(Fig. 24) den Anlegepunkt *D* verschiebt. Zu diesem Zwecke dient eine Vorrichtung in der Art des Wheatstone'schen Rheostaten, welcher auf S. 103 beschrieben wurde. Auf einer Walze von Serpentin, 45 Mm. lang und 100 Mm. im Durchmesser, liegt in 10 Schraubenwindungen ein Neusilberdraht von 0·2 Mm. Durchmesser und 3 M. Länge. Sein Widerstand beträgt 25 S. E.

Dieser Draht dient als Zweig A D B (Fig. 24). Der Contact, durch welchen das Galvanometer in Verbindung mit dem Drahte steht, wird durch ein Röllchen vermittelt, welches sich auf einer Neusilberstange bei Drehung des Schraubendrahtes verschiebt.

Für das in die Brücke einzuschaltende Galvanoskop sind die gewöhnlichen Galvanometer nicht zu gebrauchen, weil diese nur gleichgerichtete Ströme anzeigen. Um Wechselströme zu erkennen, können wir aber, wie wir S. 61 sahen, die Elektro-Dynamometer gebrauchen, deren Ablenkungsrichtung von der Stromrichtung unabhängig ist. Man hat also statt des Galvanometers bei diesen Messungen ein Elektro-Dynamometer, etwa das in Fig. 18, einzuschalten.

Weit bequemer als dieses Instrument ist das Telephon, welches unter Einwirkung von Wechselströmen einen Ton giebt. Durch die Anwendung desselben vereinfacht sich die Widerstandsmessung ganz bedeutend, ohne dass die Empfindlichkeit der Messmethode zu sehr darunter leidet. Nach Kohlrausch kann mittelst des Telephones schon ein Tausendstel Unterschied im Widerstande bemerkt werden, und eine solche Genauigkeit genügt für alle praktischen Zwecke.

Der Gebrauch dieser Messbrücke ist, wie man sieht, ein ausserordentlich bequemer. Man hat nach Einschaltung der einzelnen Theile den Inductions-Apparat in Thätigkeit zu bringen, das Telephon an das Ohr zu setzen und die Walze mit dem Verzweigungsdrahte so lange zu drehen, bis der Ton im Telephon verschwunden ist. Zur grösseren Genauigkeit dürfte es sich empfehlen, die beiden Punkte des Verzweigungsdrahtes zu bestimmen, an welchen der Ton verschwindet und wieder erscheint, weil dieselben im Allgemeinen nicht zusammenfallen werden. Aus diesen beiden Punkten ist dann der mittlere Werth als der eigentliche Theilungspunkt (Fig. 24) zu nehmen.

Fig. 65 zeigt die Anordnung der einzelnen Theile der Messbrücke, wie sie von den Herrn E. Hartmann & Co. angefertigt wird. *E* ist die Glasröhre mit dem Elektrolyten und den Elektroden, *W* die Walze mit Verzweigungsdraht, in dessen Fuss Vergleichs-Widerstände (die dritten Widerstände der Wheatstone'schen Brücke) von 1, 10, 100 und 1000 Einheiten liegen. *T* ist das Telephon und *J* der Inductions-Apparat mit Batterie. Die Widerstandscapacität des Glasgefässes wird mittelst Salzlösungen von bekannter Leitungsfähigkeit bestimmt.

A. Hartleben's Elektro-technische Bibliothek.

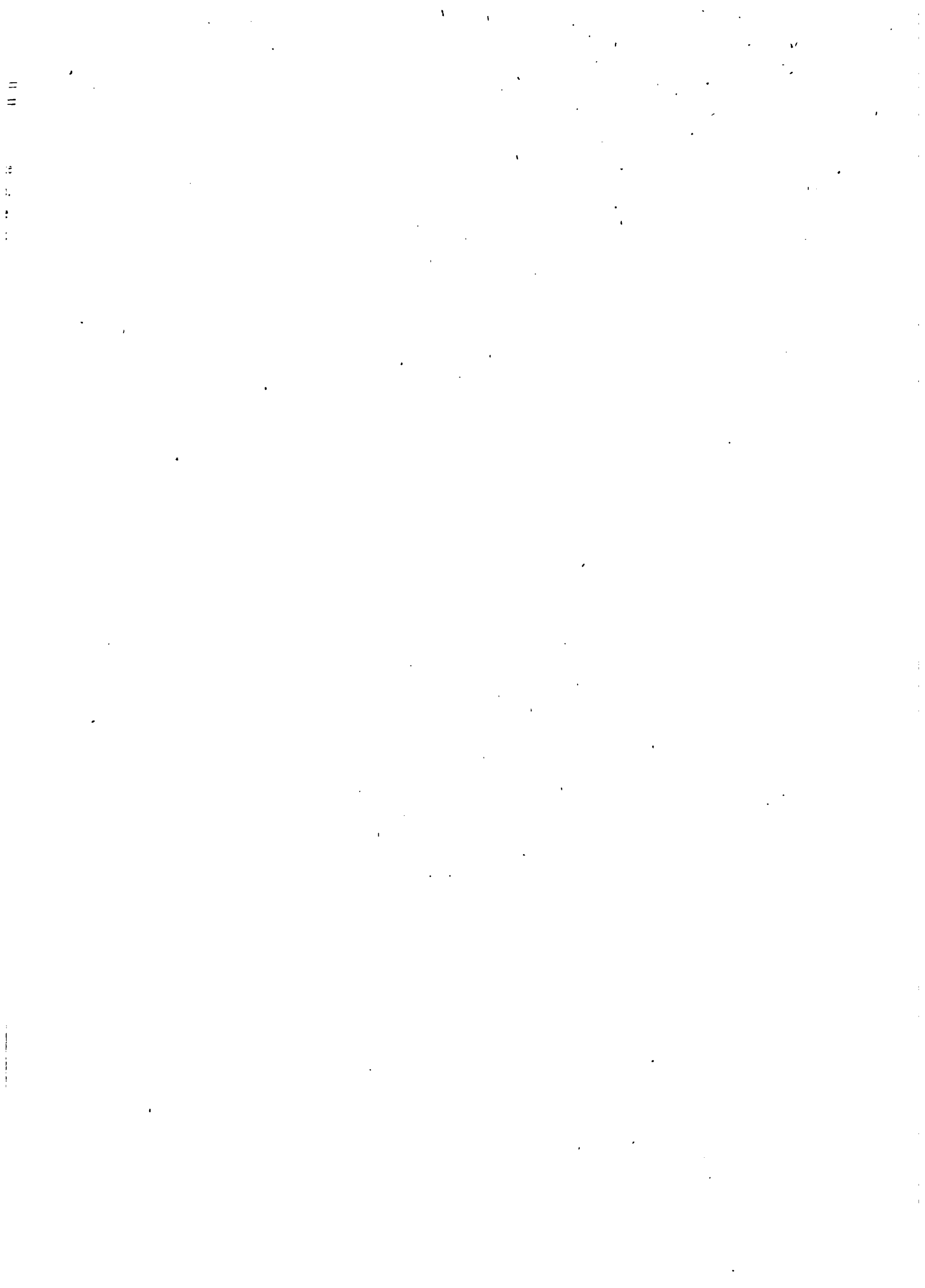
In reich illustrirten Bänden, geheftet à 1 fl. 65 kr. ö. W. = 3 Mark = 4 Francs = 1 R. 80 Kop. Elegant gebunden à 2 fl. 20 kr. ö. W. = 4 Mark = 5 Fr. 35 Cts. = 2 R. 40 Kop.

Inhalt der Sammlung.

I. Band. **Die magnetelektrischen und dynamoelektrischen Maschinen** und die sogenannten Secundär-Batterien, mit besonderer Rücksicht auf ihre Construction. Von Gustav Glaser-De Cew. Vierte Auflage. — II. Band. **Die elektrische Kraftübertragung** und ihre Anwendung in der Praxis, mit besonderer Rücksicht auf die Fortleitung und Vertheilung des elektrischen Stromes. Von Eduard Japing. Zweite Auflage. — III. Band. **Das elektrische Licht.** Von Dr. A. v. Urbanitzky. Zweite Auflage. — IV. Band. **Die galvanischen Batterien, Accumulatoren und Thermosäulen.** Eine Beschreibung der hydro- und thermo-elektrischen Stromquellen, mit besonderer Rücksicht auf die Bedürfnisse der Praxis. Von W. Ph. Hauck. Zweite Auflage. — V. Band. **Die Verkehrs-Telegraphie,** mit besonderer Rücksicht auf die Bedürfnisse der Praxis. Von J. Sack. — VI. Band. **Telephon, Mikrophon und Radiophon,** mit besonderer Rücksicht auf ihre Anwendungen in der Praxis. Von Theodor Schwartze. Zweite Auflage. — VII. Band. **Die Elektrolyse, Galvanoplastik und Reinmetallgewinnung,** mit besonderer Rücksicht auf ihre Anwendung in der Praxis. Von Eduard Japing. Zweite Auflage. — VIII. Band. **Die elektrischen Mess- und Präcisions-Instrumente,** mit besonderer Rücksicht auf ihre Construction. Ein Leitfaden der elektrischen Messkunde. Von A. Wilke. Zweite Auflage. — IX. Band. **Die Grundlehren der Elektricität,** mit besonderer Rücksicht auf ihre Anwendungen in der Praxis. Von W. Ph. Hauck. — X. Band. **Elektrisches Formelbuch** mit einem Anhange, enthaltend die elektrische Terminologie in deutscher, französischer und englischer Sprache. Von Prof. Dr. P. Zech. — XI. Band. **Die elektrischen Beleuchtungs-Anlagen,** mit besonderer Berücksichtigung ihrer praktischen Ausführung. Von Dr. A. von Urbanitzky. Zweite Auflage. — XII. Band. **Die elektrischen Einrichtungen der Eisenbahnen und das Signalwesen.** Von L. Kohlfürst. — XIII. Band. **Die elektrischen Uhren und die Feuerwehr-Telegraphie.** Von Dr. A. Tobler. — XIV. Band. **Die Haus- und Hôtel-Telegraphie.** Von O. Canter. — XV. Band. **Die Anwendung der Elektricität für militärische Zwecke.** Von Dr. Fr. Wächter. — XVI. Band. **Die elektrischen Leitungen und ihre Anlage für alle Zwecke der Praxis.** Von J. Zacharias. — XVII. Band. **Die elektrische Eisenbahn** bezüglich ihres Baues und Betriebes. Von Josef Krämer. — XVIII. Band. **Die Elektro-Technik in der praktischen Heilkunde.** Von Prof. Dr. Rudolf Lewandowski. — XIX. Band. **Die Spannungs-Elektricität und ihre technischen Anwendungen.** Von Prof. K. W. Zenger. — XX. Band. **Die Weltliteratur der Elektricität und des Magnetismus, 1860—1883.** Von Gustav May. — XXI. Band. **Die Motoren der elektrischen Maschinen** mit Bezug auf Theorie, Construction und Betrieb. Von Theodor Schwartze. — XXII. Band. **Die Generatoren hochgespannter Elektricität.** Von Prof. Dr J. G. Wallentin. — XXIII. Band. **Das Potential und seine Anwendungen** bei der Erklärung elektrischer Erscheinungen. Von Dr. O. Tumlirz. u. s. w., u. s. w.

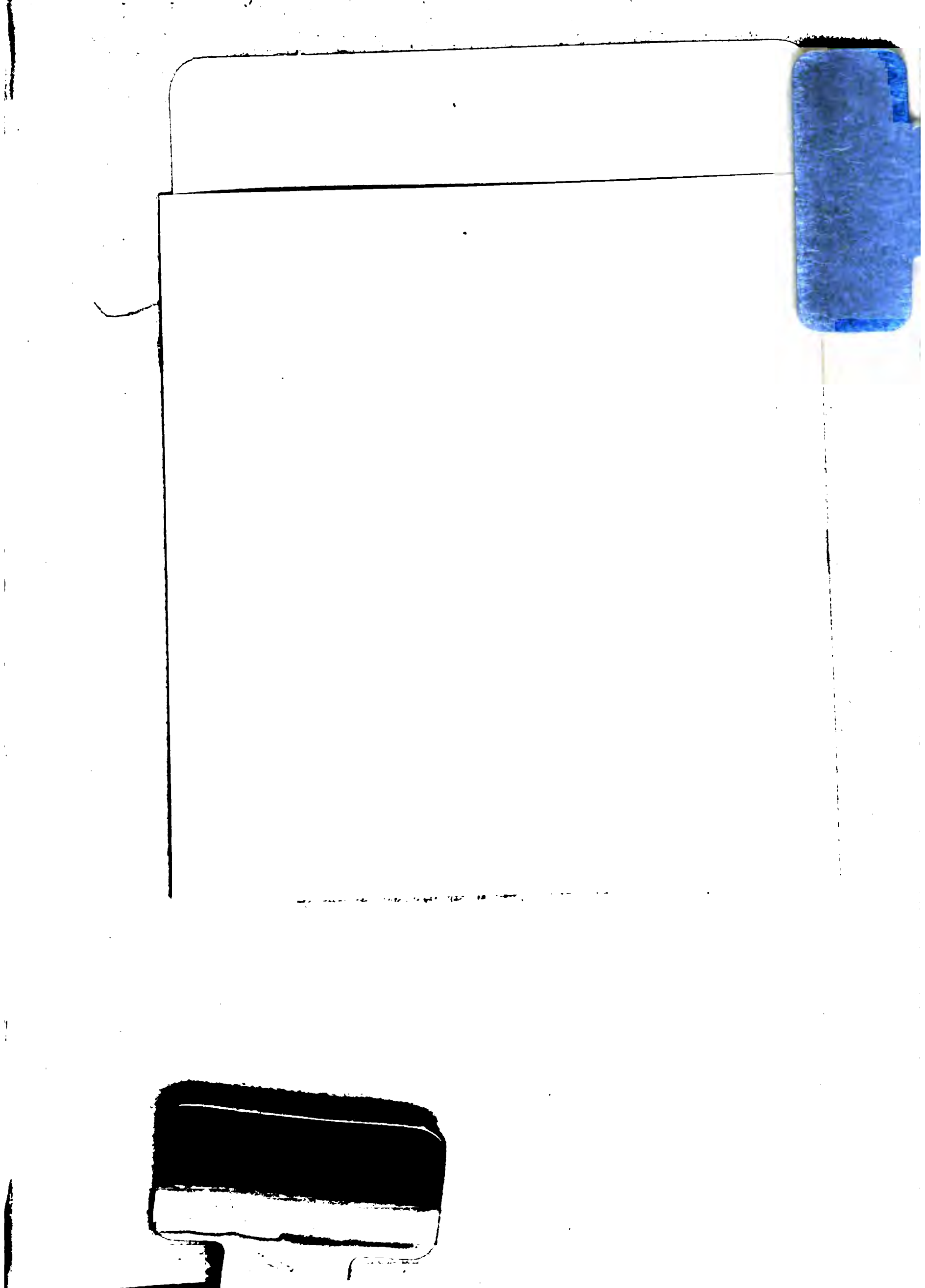
Jeder Band ist für sich vollkommen abgeschlossen und einzeln käuflich.
Preis geheftet à 1 fl. 65 kr. ö. W. = 3 Mark = 4 Francs = 1 R. 80 Kop.; elegant gebunden à 2 fl. 20 kr. ö. W. = 4 Mark = 5 Fr. 35 Cts. = 2 R. 40 Kop. Die Sammlung kann auch in Lieferungen à 30 Kr. ö. W. = 60 Pf. = 80 Cts. = 36 Kop. bezogen werden.
Einzelne Werke werden nur in der Bandausgabe ausgegeben.
Einbanddecken pro Band 40 kr. ö. W. = 75 Pf = 1 Fr. = 45 Kop.

A. Hartlebens Verlag in Wien, Pest und Leipzig.



89089685457

B89089685457A



89089685457

b89089685457a